



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC - DC  
GAIN TINGGI TOPOLOGI *SEPIC* TERMODIFIKASI  
INDUKTOR TERKOPEL UNTUK APLIKASI  
FOTOVOLTAIK**

Dewi Sucilia Kurniawati  
NRP 07111440000027

Dosen Pembimbing  
Heri Suryoatmojo, S.T, M.T., Ph.D.  
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**FINAL PROJECT - TE 141599**

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH GAIN DC -  
DC CONVERTER COUPLED - INDUCTOR MODIFIED  
*SEPIC* TOPOLOGY FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION**

Dewi Sucilia Kurniawati  
NRP 0711144000027

Advisors  
Heri Suryoatmojo, S.T, M.T., Ph.D.  
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2018



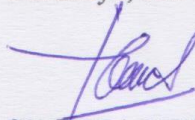
## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC - DC GAIN TINGGI TOPOLOGI SEPIC TERMODIFIKASI INDUKTOR TERKOPEL UNTUK APLIKASI FOTOVOLTAIK**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



**DEWI SUCILIA KURNIAWATI**

07111440000027

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER  
DC - DC *GAIN* TINGGI TOPOLOGI *SEPIC*  
TERMODIFIKASI INDUKTOR TERKOPEL UNTUK  
APLIKASI FOTOVOLTAIK**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik  
Pada Bidang Studi Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

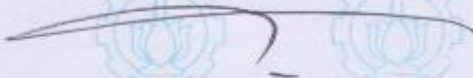
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Heri Survoatmojo, S.T., M.T., Ph.D  
NIP. 198006032006041003



Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.  
NIP. 195512071980031004



**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**



# **DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC - DC GAIN TINGGI TOPOLOGI *SEPIC* TERMODIFIKASI INDUKTOR TERKOPEL UNTUK APLIKASI FOTOVOLTAIK**

Dewi Sucilia Kurniawati  
07111440000027

Pembimbing I: Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.  
Pembimbing II: Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

## **ABSTRAK**

Sinar matahari merupakan sumber energi terbarukan yang menjadi sorotan para peneliti karena tidak menghasilkan emisi yang dapat merusak lingkungan. Sinar matahari dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan fotovoltaik. Namun tegangan keluaran fotovoltaik masih bernilai rendah sehingga tidak bisa diaplikasikan ke beban secara langsung. Tegangan keluaran fotovoltaik harus dinaikkan terlebih dahulu menggunakan konverter DC – DC penaik tegangan, contohnya konverter *boost* konvensional. Namun, konverter *boost* konvensional hanya memiliki *gain* 5 kali lipat dari tegangan masukan sehingga tidak mampu untuk menyuplai beban yang membutuhkan level tegangan yang tinggi. Topologi yang disarankan adalah *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel. Konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel memiliki dua kelebihan, yaitu *gain* yang tinggi dan efisiensi yang tinggi. Pada pengujian, konverter ini memiliki rasio hingga 20 kali dengan *duty cycle* 86% dan efisiensi yang mencapai 93,8%.

**Kata Kunci:** Fotovoltaik, *Gain* tinggi, Induktor Terkopel, Konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

# **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODIFIED COUPLED INDUCTOR *SEPIC* DC - DC CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION**

Dewi Sucilia Kurniawati  
07111440000027

Pembimbing I: Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.  
Pembimbing II: Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

## **ABSTRACT**

Sunlight is a source of renewable energy in the spotlight of researchers because it does not produce emissions that can damage the environment. Sunlight can be converted into electrical energy by using photovoltaic (PV). But the photovoltaic output voltage is still low so it can not be applied to the load directly. The photovoltaic output voltage must be increased first using a DC-DC voltage rising converter, for example a conventional boost converter. However, the conventional boost converter has only a 5-fold gain from the input voltage so it is not able to supply loads requiring high voltage levels. The recommended topology is the modified coupled inductor *SEPIC* converter. The modified coupled inductor *SEPIC* converter has two advantages, which are high gain and high efficiency. In testing, this converter has a ratio of up to 20 times with 86% duty cycle and efficiency of 93.8%.

**Keywords:** Coupled inductor, High Gain, modified coupled inductor DC - DC *SEPIC* converter, Photovoltaic

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur tiada terkira saya panjatkan kepada Allah, Tuhan yang Mahatinggi dan Maha Suci. Atas bantuan dan rahmat-Nya, maka saya dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul **“Desain Dan Implementasi Konverter DC - DC Gain Tinggi Topologi SEPIC Termodifikasi Induktor Terkopel untuk Aplikasi Fotovoltaik”**.

Saya menyadari bahwa penulisan buku penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan pada penulisan buku-buku penelitian selanjutnya.

Selama pengerjaan Tugas Akhir ini banyak pihak-pihak yang membantu baik berupa doa, bimbingan dan jasa dalam menyelesaikan Penelitian ini dan tidak lupa saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu saya Suharningsih, ayah saya Witoyo dan kakak saya Feby dan Buyung sebagai motivasi utama yang senantiasa memberi doa, semangat dan bantuan moral maupun materiil sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu.
2. Keponakan saya Azka, sebagai pemberi semangat dan tawa.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dr. Ir. Soedibjo, M.MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.
4. Keluarga Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang menemani dalam suka dan duka dan saling mendoakan: Tyas, Fano, Adam, Mada, Arifian, Wirasa, Dadan, Agyl, Deny, Yakin, Yudha, Hilmi, Faishal, Hakim, serta asisten Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik angkatan 2015.
5. Calon teman hidup yang telah tertulis di *Lauhul Mahfudz*, yang doanya selalu terpanjatkan untuk kesuksesan saya dalam penelitian ini.
6. Qori' Dwi Intansari sebagai sahabat yang selalu mengingatkan saya saat melakukan kesalahan, serta sebagai teman main dan belajar untuk mempersiapkan bekal kehidupan kelak.
7. Mas Indra, Mas Bagus, Mas Akbar, Mas Mendung, Mbak Putri, dan Mas Rifki yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama pengerjaan penelitian ini.
8. Dan semua pihak yang tak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Penulis pun memohon maaf atas segala kekurangan pada penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2018

Dewi Sucilia Kurniawati

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	<b>TUGAS</b>
<b>AKHIR .....</b>	Error
! Bookmark not defined.	
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan .....	2
1.4. Batasan Masalah .....	2
1.5. Metodologi .....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
1.7. Relevansi .....	5
<b>BAB 2 KONVERTER DC - DC <i>GAIN</i> TINGGI TOPOLOGI <i>SEPIC</i> TERMODIFIKASI INDUKTOR TERKOPEL ...</b>	<b>7</b>
2.1. Konverter DC - DC <i>SEPIC</i> Konvensional .....	7
2.1.1 Analisis Sakelar Tertutup .....	7
2.1.2 Analisis Sakelar Terbuka.....	8
2.2. Induktor Terkopel .....	11
2.2.1. <i>Self Inductance</i> dan <i>Mutual Inductance</i> .....	12
2.2.2. Pemodelan Induktor Terkopel .....	13
2.3. Konverter DC - DC <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel .....	15
2.3.1 Analisis Mode <i>Steady State</i> .....	16
2.3.2 Penurunan Persamaan Rasio Konversi.....	22
2.3.3 Penurunan Parameter Komponen .....	25
2.3.4 Analisis Mode Dinamis .....	27
<b>BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI .....</b>	<b>29</b>
3.1. Diagram Blok Sistem .....	29
3.2. Modul Fotovoltaik sebagai Masukan Konverter DC - DC <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel .....	30

3.3.	Desain Konverter DC - DC Topologi <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel.....	32
3.3.1	Penentuan Nilai Beban.....	33
3.3.2	Penentuan Rasio Konversi dan <i>Duty Cycle</i> .....	33
3.3.3	Penentuan Nilai Induktor $L_1$ dan Induktor Terkopel $L_2$ .....	35
3.3.4	Penentuan Nilai Kapasitor $C_{S1}$ , $C_{S2}$ , $C_M$ , dan $C_O$ .....	36
3.4.	Simulasi Mode <i>Steady State</i> Konverter .....	37
3.5.	Konverter pada Kondisi Dinamis .....	42
3.6.	Implementasi Konverter .....	44
3.6.1	Induktor $L_1$ dan Induktor Terkopel $L_2$ .....	44
3.6.2	Kapasitor .....	46
3.6.3	Penentuan Dioda $D_{M1}$ , $D_{M2}$ dan $D_O$ .....	47
3.6.4	Penentuan MOSFET .....	48
3.6.5	Hasil Implementasi <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel .....	48
<b>BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA .....</b>		<b>51</b>
4.1.	Alat Pengujian Konverter .....	51
4.2.	Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Komponen .....	52
4.2.1	Pengujian Pensakelaran .....	52
4.2.2	Pengujian Sinyal Pensakelaran pada Dioda .....	53
4.2.3	Pengujian Arus Induktor .....	55
4.2.4	Pengujian Tegangan Kapasitor.....	57
4.2.5	Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran Konverter .....	59
4.3.	Pengujian Rasio Konversi.....	60
4.4.	Pengujian Efisiensi .....	61
4.5.	Pengujian Rasio Konversi Menggunakan Modul Fotovoltaik .....	63
4.6.	Pengujian Respon Dinamik Konverter .....	65
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>		<b>67</b>
5.1.	Kesimpulan .....	67
5.2.	Saran .....	67
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>69</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>71</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>		<b>75</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Konverter DC - DC <i>SEPIC</i> Konvensional.....	7
<b>Gambar 2.2</b>	Rangkaian Konverter <i>SEPIC</i> Konvensional Ketika Sakelar Q Konduksi .....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Rangkaian Konverter <i>SEPIC</i> Konvensional Ketika Sakelar Q Terbuka.....	9
<b>Gambar 2.4</b>	Rangkaian ideal induktor terkopel .....	12
<b>Gambar 2.5</b>	Pemodelan Induktor Terkopel.....	14
<b>Gambar 2.6</b>	Rangkaian Konverter DC - DC Topologi <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor terkopel [4].....	15
<b>Gambar 2.7</b>	Mode Operasi I [ $t_0$ - $t_1$ ] .....	16
<b>Gambar 2.8</b>	Mode Operasi II [ $t_1$ - $t_2$ ].....	17
<b>Gambar 2.9</b>	Mode Operasi III [ $t_2$ - $t_3$ ].....	18
<b>Gambar 2.10</b>	Mode Operasi IV [ $t_3$ - $t_4$ ] .....	19
<b>Gambar 2.11</b>	Mode Operasi V [ $t_4$ - $t_5$ ].....	20
<b>Gambar 2.12</b>	Bentuk Tegangan dan Arus pada sakelar dan dioda Konverter <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel .....	20
<b>Gambar 2.13</b>	Bentuk Tegangan dan Arus pada sakelar dan dioda dan arus induktor Konverter <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel.....	21
<b>Gambar 2.14</b>	Diagram Blok Sistem Saat Mode Dinamis .....	28
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Blok Sistem Konverter .....	29
<b>Gambar 3.2</b>	(a) Karakteristik V - I dan (b) V - P dari Fotovoltaik dengan Level Irradians Tertentu [11].....	31
<b>Gambar 3.3</b>	Grafik Rasio Konversi Konverter Berdasarkan Nilai <i>Duty Cycle</i> dan n.....	34
<b>Gambar 3.4</b>	Simulasi Konverter Kondisi Tunak .....	38
<b>Gambar 3.5</b>	Gelombang $V_{GS}$ , $V_{DS}$ , $I_{DS}$ Simulasi .....	38
<b>Gambar 3.6</b>	Gelombang $V_{GS}$ , $V_{DM1}$ , $V_{DM2}$ , dan $V_{DO}$ Simulasi.....	39
<b>Gambar 3.7</b>	Gelombang $V_{GS}$ , $V_{CS1}$ , $V_{CS2}$ , dan $V_{CM}$ Simulasi .....	40
<b>Gambar 3.8</b>	Gelombang $V_{GS}$ , $I_{L1}$ , dan $I_{L2}$ Simulasi .....	41

<b>Gambar 3.9</b>	Gelombang $V_{GS}$ , $V_O$ , dan $I_O$ Simulasi.....	42
<b>Gambar 3.10</b>	Simulasi Konverter Kondisi Dinamis .....	43
<b>Gambar 3.11</b>	Respon Pengontrol Akibat Perubahan Tegangan Masukan .....	44
<b>Gambar 3.12</b>	Hasil Implementasi Alat.....	49
<b>Gambar 4.1</b>	Pengujian Modul Konverter DC - DC <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkopel.....	51
<b>Gambar 4.2</b>	Sinyal $V_{GS}$ , $V_{DS}$ dan $I_{DS}$ .....	53
<b>Gambar 4.3</b>	Sinyal $V_{GS}$ , $V_{DM1}$ , dan $V_{DM2}$ .....	54
<b>Gambar 4.4</b>	Sinyal $V_{GS}$ dan $V_{DO}$ .....	55
<b>Gambar 4.5</b>	Sinyal $V_{GS}$ , arus $I_{L1}$ dan arus $I_{L2P}$ .....	56
<b>Gambar 4.6</b>	Sinyal $V_{GS}$ , $V_{CS1}$ dan $V_{CS2}$ .....	57
<b>Gambar 4.7</b>	Sinyal $V_{GS}$ dan $V_{CM}$ .....	58
<b>Gambar 4.8</b>	Sinyal an $V_O$ dan $V_{in}$ .....	59
<b>Gambar 4.9</b>	Pengujian Rasio Konversi saat Perhitungan dan Implementasi .....	60
<b>Gambar 4.10</b>	Sinyal $V_{GS}$ dan $I_{L1}$ saat <i>Duty Cycle</i> Sebesar 30% .....	61
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik Pengujian Efisiensi Konverter .....	62
<b>Gambar 4.12</b>	Kurva Plot Fotovoltaik.....	63
<b>Gambar 4.13</b>	Perbandingan Nilai Gain Konverter dari Hasil Perhitungan, Pengujian Menggunakan <i>Variable</i> <i>Variable DC Supply</i> dan Pengujian Menggunakan Fotovoltaik .....	64
<b>Gambar 4.14</b>	Pengujian Modul Konverter dengan Tegangan Masukan dari Fotovoltaik .....	65
<b>Gambar 4.15</b>	Hasil Pengujian Dinamik Konverter.....	66

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi Modul Fotovoltaik yang Digunakan Dalam Pengujian.....	31
<b>Tabel 3.2</b> Spesifikasi Awal Desain Konverter .....	32
<b>Tabel 3.3</b> Hubungan <i>Duty Cycle</i> dan $n$ Terhadap Nilai Rasio Konversi .....	33
<b>Tabel 3.4</b> Parameter induktor $L_1$ dan $L_2$ .....	36
<b>Tabel 3.5</b> Parameter Inti Induktor [15] .....	45
<b>Tabel 3.6</b> Komponen Implementasi <i>SEPIC</i> Termodifikasi Induktor Terkoppel .....	48

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Dewasa ini penelitian mengenai energi terbarukan semakin marak dikarenakan menipisnya persediaan sumber energi fosil di bumi. Selain itu, faktor lain yang mendukung ialah semakin meningkatnya polusi udara yang menyebabkan pemanasan global dan kerusakan lapisan ozon yang akan berdampak pada kelangsungan hidup manusia. Dengan adanya penelitian mengenai energi terbarukan ini diharapkan dapat mendukung kelangsungan hidup manusia karena dapat memenuhi kebutuhan akan energi dengan tetap memperhatikan faktor kesehatan lingkungan.

Beberapa energi terbarukan yang marak diteliti adalah *fuel cell* dan fotovoltaik. Pemanfaatan energi terbarukan tersebut biasanya pada kendaraan listrik atau pada rumah yang mandiri energi. Terdapat kelebihan utama fotovoltaik dibandingkan dengan *fuel cell*, yaitu ketersediaan sumbernya ada di seluruh bumi, mudahnya instalasi, tidak memiliki emisi dan keandalan yang tinggi [1]. Selain itu modul fotovoltaik dapat berumur hingga 20 tahun sehingga dapat meminimalisir perawatan [2].

Salah satu pengaplikasian fotovoltaik adalah modul fotovoltaik skala perumahan yang dihubungkan dengan jala-jala. Tegangan keluaran fotovoltaik (tegangan DC) harus dihubungkan dengan inverter agar dapat menjadi tegangan AC. Untuk dapat menjadi tegangan AC RMS 220 V, maka input tegangan inverter harus bernilai 380 V untuk inverter *full bridge* atau 760 V untuk inverter *half bridge* [1]. Namun tegangan keluaran dari fotovoltaik masih bernilai rendah, sehingga diperlukan konverter DC - DC untuk menaikkan tegangan keluarannya agar sesuai standar tegangan input inverter.

Beberapa topologi yang sudah diaplikasikan adalah konverter DC - DC *voltage multiplier* dengan kontrol PWM dan konverter DC - DC topologi *SEPIC* (*Single Ended Primary Inductance Converter*) konvensional. Namun metode *voltage multiplier* dengan kontrol PWM memiliki kelemahan yaitu sistem kontrol yang kompleks karena merupakan topologi dua tahap yang menggunakan 3 switch, serta rugi-rugi lebih besar dan biaya lebih banyak [3]. Sedangkan *SEPIC* konvensional memiliki *gain* standar yaitu 5 kali lipat. Untuk dapat

memenuhi standar tegangan input inverter, maka diperlukan konverter DC - DC dengan *gain* lebih besar dari 10 kali [4].

Karena itu, penulis mengusulkan untuk menggunakan konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel yang memiliki *gain* 20 kali, yang berarti tegangan keluaran bernilai 20 kali dari tegangan masukan. Selain itu, adanya induktansi bocor pada induktor terkopel dapat mengurangi rugi-rugi pada sakelar dan mengurangi rugi-rugi akibat *reverse recovery current* pada dioda [4], sehingga konverter DC - DC topologi *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada kedua topologi yang telah disebutkan. Sehingga hasil akhir dari penerapan konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel adalah nilai tegangan keluaran fotovoltaik yang tinggi dan efisiensi konverter yang tinggi.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Fotovoltaik memiliki kekurangan yaitu tegangan keluaran yang rendah, sehingga harus dinaikkan tegangannya agar dapat terhubung dengan inverter yang terhubung jala-jala. Pemecahan yang ingin diselesaikan adalah desain dan implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel yang memiliki *gain* 20 kali dengan efisiensi tinggi untuk aplikasi pada fotovoltaik.

## **1.3. Tujuan**

Penelitian ini memiliki tujuan seperti di bawah ini:

1. Membuat desain dan implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel yang memiliki *gain* tinggi dan efisiensi tinggi untuk aplikasi pada fotovoltaik.
2. Mengetahui hal-hal yang berkaitan dengan konverter DC - DC topologi *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel untuk aplikasi pada fotovoltaik.
3. Membandingkan dan menganalisis hasil implementasi dengan hasil desain dan simulasi konverter topologi *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel untuk aplikasi pada fotovoltaik.

## **1.4. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat di pasaran dan peralatan uji di Laboratorium Konversi Energi Listrik.

2. Pengujian hasil implementasi menggunakan sumber tegangan *Variable Variable DC Supply*, modul fotovoltaik *Solar Module* serta beban *rheostat* yang terdapat pada laboratorium.
3. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam mode tunak (*steady state*).

## **1.5. Metodologi**

### **1. Studi Literatur**

Kegiatan mempelajari hal-hal yang berkaitan dengan konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel. Beberapa hal yang perlu dipelajari adalah prinsip kerja konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel, penurunan rasio konversi, rumus perhitungan komponen, pembuatan induktor terkopel, prinsip kerja dan cara pembuatan PWM menggunakan Arduino - Nano dan mempelajari karakteristik setiap komponen yang digunakan untuk implementasi konverter.

### **2. Desain dan Simulasi**

Desain dan simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* PSIM. Pada tahap ini ditentukan nilai parameter komponen yang akan digunakan pada implementasi konverter. Penentuan parameter komponen dilakukan dengan mempertimbangkan ketersediaan komponen di pasaran serta *rating* peralatan uji di laboratorium. Hasil simulasi menjadi acuan apakah konverter telah bekerja sesuai desain yang telah ditentukan.

### **3. Implementasi Alat**

Pada tahap ini dilakukan pengimplementasian konverter berdasarkan hasil perhitungan parameter pada tahap desain. PCB akan didesain menggunakan *software* EAGLE. Beberapa komponen yang diperlukan adalah satu buah MOSFET, tiga buah dioda, satu buah induktor, satu buah induktor terkopel, tiga buah kapasitor, dan rangkaian *MOSFET - driver*. Hasil akhir dari tahap ini adalah konverter yang siap untuk diuji.

### **4. Pengujian Alat**

Pada tahap ini dilakukan pengujian konverter yang telah diimplementasikan. Pengujian dilakukan secara bertahap, yaitu pengujian sinyal pensakelaran, pengujian tegangan keluaran dan rasio konversi, pengujian karakteristik arus dan tegangan komponen, pengujian efisiensi konverter, pengujian mode dinamis, dan pengujian menggunakan modul

fotovoltaik. Saat pengujian laboratorium menggunakan sumber *Variable DC Supply* serta *rheostat* sebagai beban.

## **5. Analisa Data**

Setelah dilakukan pengujian dan diperoleh data uji, maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisa data. Analisis dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara hasil uji konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dengan hasil simulasi pada *software* PSIM. Analisis data meliputi bentuk sinyal pensakelaran, bentuk sinyal *charging - discharging* kapasitor dan induktor, tegangan dioda, rasio konversi, dan efisiensi konverter.

## **6. Kesimpulan**

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisa data yang diperoleh dari simulasi, perhitungan dan pengujian implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel.

### **1.6. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab terurai sebagai berikut:

#### **BAB 1 Pendahuluan**

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi penelitian ini.

#### **BAB 2 Dasar Teori**

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang analisis mode tunak konverter DC - DC *SEPIC* konvensional, analisis mode tunak dan dinamis konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel. Di dalam analisis mode tunak terdapat penurunan rumus rasio konversi, dan penurunan rumus parameter komponen.

#### **BAB 3 Desain, Simulasi, dan Implementasi**

Bab ini berisi mengenai desain konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel secara matematis, simulasi rangkaian menggunakan *software* PSIM dan implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel. Desain rangkaian secara matematis berupa perhitungan nilai parameter rangkaian yang digunakan seperti nilai induktor dan



kapasitor. Dalam subbab implementasi dijelaskan mengenai pembuatan dan pemilihan komponen dengan memperhatikan *rating* tegangan dan arus yang melalui komponen tersebut.

#### **BAB 4 Pengujian dan Analisis Data**

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dari hasil simulasi dan implementasi. Pengujian yang dilakukan merupakan pengujian dalam skala laboratorium.

#### **BAB 5 Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk perkembangan selanjutnya.

### **1.7. Relevansi**

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi yang dapat menunjang industri kelistrikan terutama yang berhubungan dengan bidang energi terbarukan.
2. Menjadi referensi untuk pengembangan sistem fotovoltaik yang terhubung ke jala-jala.
3. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil masalah serupa untuk penelitian.

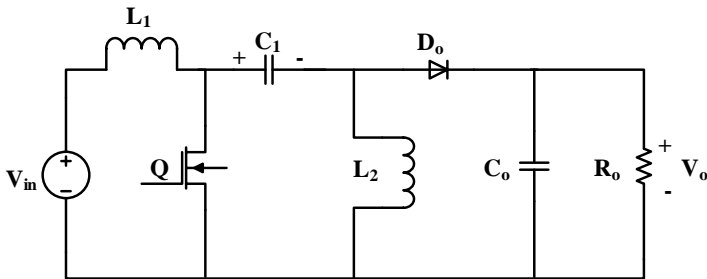
**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

## BAB 2

### KONVERTER DC - DC *GAIN* TINGGI TOPOLOGI *SEPIC* TERMODIFIKASI INDUKTOR TERKOPEL

#### 2.1. Konverter DC - DC *SEPIC* Konvensional

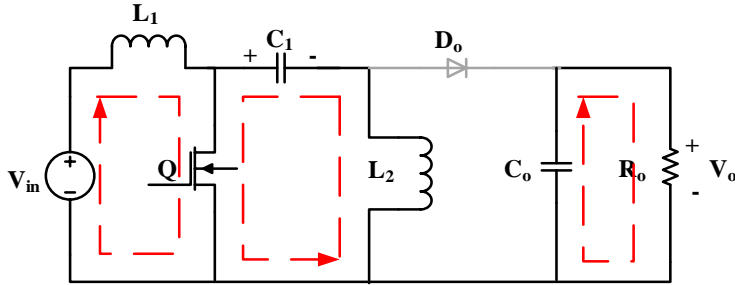
Konverter DC - DC *SEPIC* (*Single-Ended Primary Converter*) konvensional adalah konverter yang dapat menghasilkan tegangan keluaran yang bernilai lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan masukan [5]. Rangkaian *SEPIC* konvensional terdiri dari dua induktor  $L_1$  dan  $L_2$ ; *coupling capacitor*  $C_1$ ; kapasitor *output*  $C_o$ ; sakelar semikonduktor  $Q$ ; dan dioda *output*  $D_o$ . Rangkaian konverter *SEPIC* konvensional terdapat pada gambar 2.1 [6].



**Gambar 2.1** Konverter DC - DC *SEPIC* Konvensional

##### 2.1.1 Analisis Sakelar Tertutup

Pada saat sakelar  $Q$  konduksi maka terdapat tiga *loop* yang aktif di rangkaian, karena dioda  $D_o$  dalam mode *reverse-biased*. Pada *loop* pertama, induktor  $L_1$  mengalami mode *charge* akibat arus yang mengalir dari  $V_{in}$  menuju sakelar  $Q$ . Pada waktu yang sama, kapasitor  $C_1$  mengisi energi pada induktor  $L_2$  melalui sakelar  $Q$ . Kapasitor  $C_1$  sebelumnya telah terisi pada saat sakelar  $Q$  pertama kali konduksi.



**Gambar 2.2** Rangkaian Konverter *SEPIC* Konvensional Ketika Sakelar Q Konduksi

Pada gambar 2.2 diperoleh persamaan saat sakelar Q konduksi seperti di bawah ini:

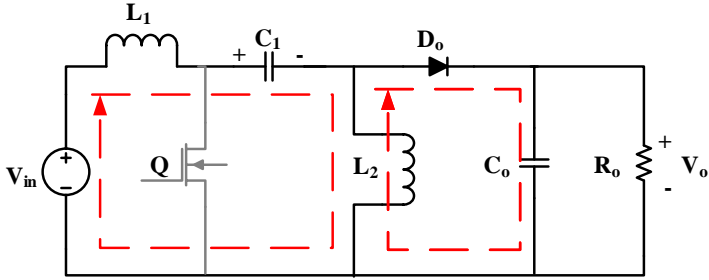
$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_{L_{1on}} = L_1 \cdot \frac{dI_{L_1}}{dt} = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L_1}}{t_{on}} \\
 V_{in} \cdot t_{on} &= L_1 \cdot \Delta I_{L_1} \\
 V_{in} &= \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L_1}}{t_{on}} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{C_1} &= V_{L_{2on}} = L_2 \cdot \frac{dI_{L_2}}{dt} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2}}{t_{on}} \\
 V_{C_1} \cdot t_{on} &= L_2 \cdot \Delta I_{L_2} \\
 V_{C_1} &= \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L_2}}{t_{on}} \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

### 2.1.2 Analisis Sakelar Terbuka

Pada saat sakelar Q terbuka, dioda  $D_0$  berada dalam mode *forward-biased*. Arus dari tegangan masukan akan mengalir melalui induktor  $L_1$  untuk mengisi muatan kapasitor  $C_1$  dan menuju beban  $R_0$ . Induktor  $L_1$  berada dalam mode *discharge* sehingga berperan mengisi muatan pada kapasitor  $C_1$  dan mengalirkan arus menuju beban. Pada

waktu yang bersamaan,  $L_2$  juga mengalami mode *discharge* sehingga arus mengalir menuju beban.



**Gambar 2.3** Rangkaian Konverter *SEPIC* Konvensional Ketika Sakelar Q Terbuka

Gambar 2.3 yaitu rangkaian ekuivalen pada saat sakelar terbuka. Dari rangkaian di atas dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{in} + V_{L_{1off}} = V_{L_{2off}} + V_{C_1}$$

$$V_{in} + L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L_1}}{t_{off}} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2}}{t_{off}} + V_{C_1} \quad (2.3)$$

$$V_{L_{2off}} = V_{C_o}$$

$$V_{L_{2off}} = V_{out}$$

$$L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2}}{t_{off}} = V_{out} \quad (2.4)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.1 dan 2.2 pada persamaan 2.3 maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_{in} + L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L_1}}{t_{off}} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2}}{t_{off}} + V_{C_1}$$

$$\frac{L_1 \cdot \Delta I_{L_1}}{t_{on}} + L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L_1}}{t_{off}} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2}}{t_{off}} + \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L_2}}{t_{on}}$$

$$\begin{aligned}
\frac{L_1 \cdot \Delta I_{L_1} \cdot t_{\text{off}}}{t_{\text{on}} \cdot t_{\text{off}}} + L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L_1} \cdot t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} \cdot t_{\text{off}}} &= L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2} \cdot t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} \cdot t_{\text{off}}} + \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L_2} \cdot t_{\text{off}}}{t_{\text{on}} \cdot t_{\text{off}}} \\
V_{\text{in}} + V_{\text{in}} \cdot \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} &= V_{C_1} \cdot \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} + V_{C_1} \\
V_{\text{in}} + V_{\text{in}} \frac{DT}{(1-D)T} &= V_{C_1} \frac{DT}{(1-D)T} + V_{C_1} \\
V_{\text{in}} \left( 1 + \frac{D}{(1-D)} \right) &= V_{C_1} \left( 1 + \frac{D}{(1-D)} \right) \\
V_{\text{in}} &= V_{C_1}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.5 pada persamaan 2.2 maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
V_{C_1} &= \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L_2}}{t_{\text{on}}} \\
V_{\text{in}} &= \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L_2}}{t_{\text{on}}}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.6 pada persamaan 2.4, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2}}{t_{\text{off}}} &= V_{\text{out}} \\
L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L_2} \cdot t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} \cdot t_{\text{off}}} &= V_{\text{out}} \\
V_{\text{in}} \cdot \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} &= V_{\text{out}} \\
V_{\text{in}} \cdot \frac{DT}{(1-D)T} &= V_{\text{out}}
\end{aligned}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (2.7)$$

Persamaan 2.7 merupakan persamaan rasio konversi dari konverter DC - DC *SEPIC* konvensional. Nilai tegangan keluaran bergantung pada nilai *duty cycle* yaitu antara nilai 0 - 1. Pada konverter *SEPIC* konvensional, perubahan nilai *duty cycle* akan menyebabkan tegangan keluaran bernilai kurang, sama dengan atau lebih besar dari tegangan masukan, seperti yang terdapat pada tabel 2.1.

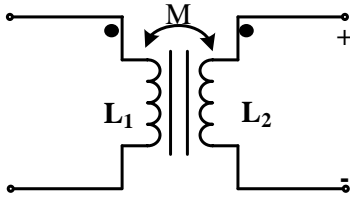
**Tabel 2.1** Keadaan  $V_{in}$  dan  $V_{out}$  pada nilai *duty cycle* tertentu

Duty Cycle	Keadaan $V_{in}$ dan $V_{out}$
$0 \leq D < 0,5$	$V_{in} > V_o$
$D = 0,5$	$V_{in} = V_o$
$0,5 < D < 1$	$V_{in} < V_o$

## 2.2. Induktor Terkopel

Induktor terkopel adalah dua buah induktor yang dibelit pada satu buah inti yang sama. Induktor terkopel banyak digunakan karena lebih kompak, integrasi yang lebih baik, dan induktansi yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan dua buah induktor tunggal [7]. Selain itu induktor terkopel memiliki harga yang lebih rendah dari pada dua buah induktor tunggal. Belitan primer dan sekunder induktor terkopel dapat dibelit secara seri, paralel maupun terpisah sesuai kebutuhan. Rangkaian ideal induktor terkopel adalah seperti gambar 2.4.

Induktor terkopel memiliki variabel yang sama dengan transformator, yaitu adanya *self inductance* dan *mutual inductance*. *Self inductance* dari induktor terkopel dinotasikan sebagai  $L$  dan *mutual inductance* dinotasikan sebagai  $M$ . Tanda dot pada gambar 2.4 mengindikasikan titik keluarnya arus pada belitan primer dan sekunder. Titik ini akan berkaitan dengan berubahnya nilai polaritas *Mutual inductance*.



**Gambar 2. 4** Rangkaian ideal induktor terkopel

### 2.2.1. *Self Inductance dan Mutual Inductance*

*Self inductance* adalah nilai induktansi suatu belitan akibat adanya arus listrik yang mengalir pada belitan. Arus listrik ini akan menimbulkan induksi elektromagnetik sehingga muncul tegangan terinduksi pada belitan tersebut, sesuai dengan Hukum *Faraday*. *Self inductance* selain dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir, juga dipengaruhi oleh jumlah belitan konduktor ( $N$ ) dan koefisien inti induktor ( $Al$ ), seperti yang terdapat pada persamaan 2.8.

$$L = N^2 \cdot Al \quad (2.8)$$

Hubungan antara medan dan tegangan yang diinduksikan berdasarkan Hukum *Faraday* dituliskan dalam persamaan 2.9.

$$V_L = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.9)$$

*Fluks* atau medan magnet yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah belitan ( $N$ ), koefisien inti induktor ( $Al$ ) dan arus medan ( $i$ ), seperti yang tertulis pada persamaan 2.10.

$$\phi = Al \cdot N \cdot i \quad (2.10)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.8 dan 2.10 pada persamaan 2.9, maka akan menjadi persamaan tegangan induktor seperti pada 2.11.

$$\begin{aligned} V_L &= N^2 \cdot Al \cdot \frac{di}{dt} \\ V_L &= L \cdot \frac{di}{dt} \end{aligned} \quad (2.11)$$



Berdasarkan gambar 2.4, apabila pada induktor pertama dialiri arus, maka akan terbangkit *fluks* ( $\phi$ ) yang menginduksi induktor kedua. Bila dua induktor dibelit pada inti yang sama, maka medan elektromagnetik induktor pertama ( $\phi_{11}$ ) akan menimbulkan induksi medan elektromagnetik induktor kedua ( $\phi_{12}$ ), dan begitu pula sebaliknya, yaitu medan elektromagnetik induktor kedua ( $\phi_{22}$ ) akan menimbulkan induksi medan elektromagnetik pada induktor pertama ( $\phi_{21}$ ). Hal ini disebut sebagai *mutual inductance* (M) [9]. Persamaan tegangan induktor dipengaruhi oleh *mutual inductance* adalah sebagai berikut:

$$V_{L_1} = N_1 \cdot \frac{d\phi_{11}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (2.12)$$

$$V_{L_2} = N_2 \cdot \frac{d\phi_{21}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi_{22}}{dt} \quad (2.13)$$

Atau dalam bentuk lain dapat ditulis:

$$V_{L_1} = L_{11} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (2.14)$$

$$V_{L_2} = L_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{22} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (2.15)$$

$V_{L1}$  merupakan tegangan induktor primer,  $V_{L2}$  merupakan tegangan induktor sekunder,  $L_{11}$  dan  $L_{22}$  merupakan induktansi diri belitan primer dan belitan sekunder,  $L_{12}$  dan  $L_{21}$  adalah induktansi bersama induktor terkopel,  $i_1$  merupakan arus yang mengalir pada belitan primer dan  $i_2$  merupakan arus yang mengalir pada belitan sekunder. Rangkaian pemodelan induktor terkopel terdapat pada gambar 2.5.

### 2.2.2. Pemodelan Induktor Terkopel

Pada gambar 2.5,  $k$  merupakan koefisien kopling, yaitu representasi dari kerapatan kopel induktor yang dibuat. Semakin besar nilai koefisien kopling maka akan semakin bagus kualitas dari induktor terkopel. Nilai  $k$  berkisar antara 0 sampai dengan 1 [10].

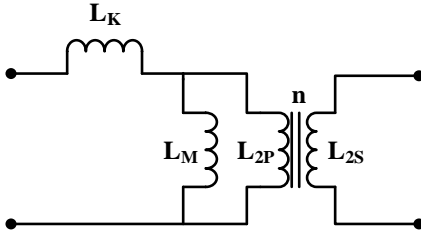
$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}} \quad (2.16)$$

Pada gambar 2.5 yang merupakan pemodelan induktor terkopel, terdapat variabel  $L_k$  dan  $L_m$ .  $L_k$  adalah induktansi bocor, yaitu induktansi yang terukur pada belitan pertama saat belitan yang kedua dihubungsingkatkan [8]. Dimana nilai  $L_k$  dapat dihitung dengan rumus 2.17. Nilai  $di/dt$  maksimum pada penelitian ini adalah sebesar  $25 \text{ A}/\mu\text{s}$  [4].

$$L_k = \frac{V_{in}}{(1 - D) \cdot \frac{di}{dt} \cdot n} \quad (2.17)$$

$L_m$  adalah induktansi magnetik, yaitu diukur pada belitan yang bersangkutan dengan tetap membiarkan belitan satunya dalam keadaan *open*. Nilai  $L_m$  dirumuskan pada persamaan 2.18, yaitu nilai induktansi belitan primer dikurangi dengan nilai induktansi bocor [8].

$$L_m = L_{2p} - L_k \quad (2.18)$$



**Gambar 2.5** Pemodelan Induktor Terkopel

Induktansi belitan sekunder,  $L_{2s}$ , dituliskan sesuai dengan rumus 2.19 [4].

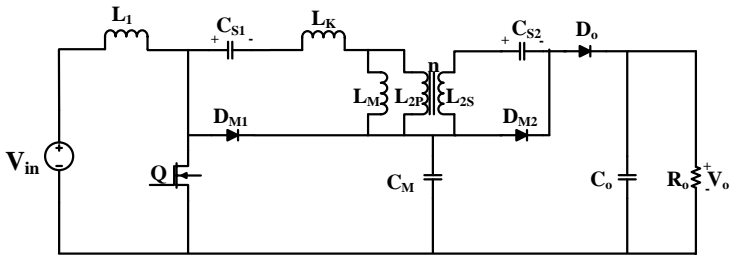
$$L_{2s} = n^2 \cdot L_{2p} \quad (2.19)$$

Yang mana  $n$  adalah perbandingan belitan sekunder dan primer, yang dituliskan sesuai rumus 2.20.

$$n = \frac{N_{L_{2s}}}{N_{L_{2p}}} = \sqrt{\frac{L_{2s}}{L_{2p}}} \quad (2.20)$$

### 2.3. Konverter DC - DC *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel

Yang membedakan konverter *SEPIC* termodifikasi dengan konverter *SEPIC* konvensional adalah terdapat penambahan beberapa komponen pada rangkaian. Komponen yang digunakan pada *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel ialah induktor  $L_1$ , induktor terkopel  $L_2$ , sakelar  $Q$ , kapasitor  $C_{S1}$ , kapasitor  $C_{S2}$ , kapasitor  $C_M$ , dioda  $D_{M1}$ , dioda  $D_{M2}$ , dioda  $D_O$ , kapasitor  $C_O$ , dan resistor  $R_O$ . Pada konverter *SEPIC* termodifikasi ini,  $L_2$  merupakan induktor terkopel dengan perbandingan belitan sekunder dan primer bernilai  $n$ . Modifikasi lain yang dilakukan adalah dengan menggunakan kapasitor  $C_{S2}$  dan dioda  $D_{M2}$  sebagai *voltage multiplier*. Rangkaian konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel ditunjukkan pada gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Rangkaian Konverter DC - DC Topologi *SEPIC* Termodifikasi Induktor terkopel [4]

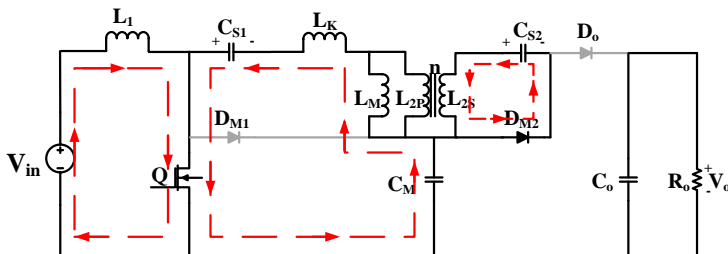
Induktor terkopel  $L_2$  memiliki operasi yang sama dengan induktor pada *buck-boost converter* yang mana bagian sekundernya dapat meningkatkan tegangan keluaran sesuai perbandingan rasio belitan sekunder dan primer ( $n$ ). Namun, terjadi *overvoltage* pada dioda  $D_O$  dikarenakan adanya induktansi bocor pada belitan induktor terkopel  $L_2$ .

Energi yang tersimpan pada induktansi bocor  $L_k$  akan menyebabkan *high reverse voltage* pada dioda  $D_O$  dikarenakan adanya *reverse recovery current* pada dioda  $D_O$ . Untuk mengatasi *overvoltage* ini digunakan kapasitor  $C_{S2}$  dan  $D_{M2}$  sebagai *voltage multiplier* di sisi sekunder. *Voltage multiplier* ini selain dapat meningkatkan *gain* konverter, juga dapat memperkecil nilai tegangan  $D_O$  sehingga bernilai lebih rendah dari tegangan keluaran  $V_{out}$ . Selain itu *voltage multiplier* berfungsi sebagai penyalur energi yang tersimpan pada induktansi bocor  $L_k$  [4].

Analisa konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dilakukan pada mode *Continuous Current Mode (CCM)* pada kelima mode operasinya. Saat mode CCM, *ripple* arus bernilai kecil sehingga rugi-rugi belitan AC dan rugi-rugi inti tidak terlalu signifikan, tidak seperti pada mode *Discontinuous Current Mode (DCM)*, dimana rugi-rugi AC lebih mendominasi [11]. Kapasitor  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$ ,  $C_M$  berfungsi sebagai sumber tegangan sesuai dengan 5 mode operasi yang terjadi pada konverter. Analisa rasio konversi (*gain*) konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dilakukan dengan menganalisa kelima mode operasi konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel.

### 2.3.1 Analisis Mode Steady State

Analisis mode *steady state* dilakukan dengan menganalisis prinsip kerja rangkaian konverter berdasarkan mode operasi konverter. Konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel memiliki lima mode operasi. Mode operasi konverter dapat dianalisis dengan mengamati perilaku masing-masing komponen pada saat sakelar  $Q$  tertutup dan terbuka. Semua komponen dianggap ideal kecuali induktor terkopel yang dimodelkan sebagai transformer ideal yang memiliki induktansi bocor dan induktansi magnetisasi. Tegangan kapasitor dianggap konstan selama satu periode pensakelaran dan arus induktor berada dalam mode *Continuous Current Mode (CCM)*. Analisa kelima mode operasi konverter DC – DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel adalah sebagai berikut.



**Gambar 2.7** Mode Operasi I [ $t_0-t_1$ ]

Gambar 2.7 merupakan mode operasi I konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel ketika sakelar  $Q$  tertutup pada waktu [ $t_0-t_1$ ]. Pada mode ini, dioda  $D_{M1}$  dan dioda  $D_O$  dalam mode *reverse-biased*. Arus masukan akan mengisi muatan pada induktor  $L_1$  sehingga  $L_1$  akan menyimpan energi. Pada *loop* kedua, terjadi pengisian muatan  $C_M$  oleh

induktor  $L_{2P}$  ( $L_m$  dan  $L_k$ ) dan  $C_{S1}$ . Lalu, pada *loop* ketiga, arus akan mengisi muatan pada kapasitor  $C_{S2}$  melalui induktor  $L_{2S}$  dan dioda  $D_{M2}$ . Mode ini berakhir ketika  $I_{DM2}$  bernilai nol. Persamaan mode I adalah sebagai berikut:

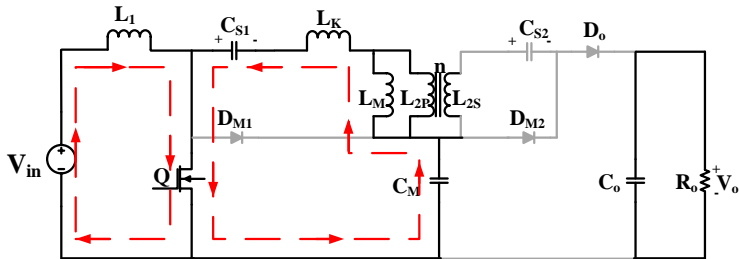
$$V_{in} = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{t_{on}} \quad (2.21)$$

$$V_{CM} = V_{L_{2P}} + V_{C_{S1}}$$

$$V_{CM} = L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{t_{on}} + V_{C_{S1}} \quad (2.22)$$

$$V_{C_{S2}} = L_{2S} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2S}}}{t_{on}} \quad (2.23)$$

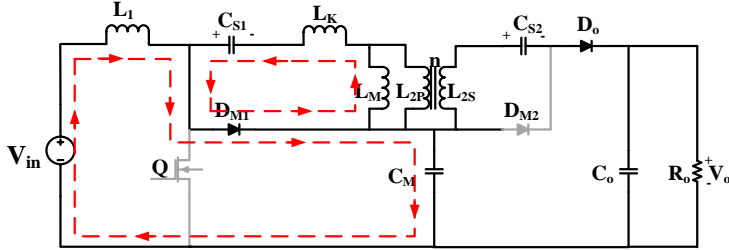
Pada persamaan 2.21, arus induktor akan naik dari  $I_{L1min}$  hingga  $I_{L1max}$ , hal ini disebabkan adanya pengisian muatan induktor  $L_1$  oleh  $V_{in}$ . Pada persamaan 2.22, tegangan kapasitor  $C_M$  sama dengan penjumlahan tegangan  $L_{2P}$  dan tegangan kapasitor  $C_{S1}$ . Pada persamaan 2.23, timbul arus pada  $L_{2S}$  akibat adanya arus yang mengalir pada  $L_{2P}$ . Besarnya arus pada  $L_{2P}$  tidak konstan, namun berubah terhadap waktu, seiring dengan terbuka dan tertutupnya sakelar Q, sehingga timbul fluks, yang kemudian disalurkan oleh inti induktor lalu timbul tegangan pada  $L_{2S}$ . Karena *loop* tertutup, maka akan mengalir arus melalui dioda  $D_{M2}$  yang akan mengisi muatan pada kapasitor  $C_{S2}$ . Perubahan arus kapasitor dari  $I_{CS2min}$  menuju  $I_{CS2max}$  akan menimbulkan *ripple* arus pada kapasitor.



**Gambar 2.8** Mode Operasi II [ $t_1$ - $t_2$ ]

Mode operasi II terjadi ketika sakelar Q tertutup pada  $t_1$  hingga sesaat terbuka pada  $t_2$ . Mode operasi II merupakan mode operasi yang paling panjang pada konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel.

Pada awal  $t_1$ , dioda  $D_{M2}$  diblok karena kapasitor  $C_{S2}$  telah berada dalam kondisi *full charge* sehingga arus yang mengalir sangat kecil. Selama sakelar Q tertutup, induktor  $L_1$  dan  $L_2$  terus menyimpan energi dan arus akan meningkat secara linear. Mode operasi II berakhir saat sakelar dalam mode terbuka atau tidak ada arus yang mengalir, serta dioda  $D_{M1}$  dan  $D_O$  *forward-biased*.



**Gambar 2. 9** Mode Operasi III [ $t_2$ - $t_3$ ]

Pada mode operasi III, sakelar Q terbuka pada [ $t_2$ - $t_3$ ]. Dioda  $D_{M1}$  dalam mode *forward-biased* sehingga energi yang tersimpan di induktor  $L_1$  akan ditransfer ke kapasitor  $C_M$ . Tegangan pada kapasitor  $C_M$  merupakan penjumlahan tegangan masukan  $V_{in}$  dan tegangan induktor  $L_1$ . Pada saat ini dioda  $D_O$  mengalami mode *forward-biased*, lalu terjadi pengosongan muatan ke resistor beban  $R_O$  dari kapasitor  $C_M$ ,  $C_{S2}$ , dan induktor  $L_2$ . Persamaan pada mode operasi III adalah sebagai berikut:

$$V_{CM} = V_{in} + V_{L_{1off}}$$

$$V_{CM} = V_{in} + L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{t_{off}} \quad (2.24)$$

$$V_{C_{S1}} = V_{L_{2Poff}}$$

$$V_{C_{S1}} = L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{t_{off}} \quad (2.25)$$

$$V_{L_{2S}} = V_{C_O} - V_{C_{S2}} - V_{C_M}$$

Yang mana tegangan  $V_{C_O}$  bernilai sama dengan tegangan  $V_O$ .

$$V_{L_{2S}} = V_O - V_{C_{S2}} - V_{C_M} \quad (2.26)$$

Pada induktor terkopel, perbandingan balitan sekunder dan primer bernilai  $n$ , yaitu seperti pada persamaan 2.27.

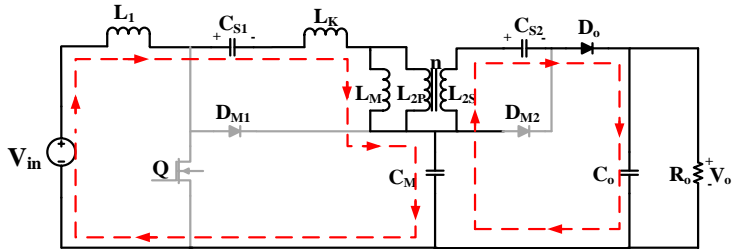
$$n = \frac{N_{L2S}}{N_{L2P}} = \frac{V_{L2S}}{V_{L2P}} \quad (2.27)$$

Maka, substitusi persamaan 2.27 pada persamaan 2.26 akan menghasilkan persamaan tegangan keluaran  $V_O$  di bawah ini.

$$\begin{aligned} V_{L2S} &= V_O - V_{C_{S2}} - V_{CM} \\ n \cdot V_{L2P} &= V_O - V_{C_{S2}} - V_{CM} \\ V_O &= n \cdot V_{L2P} + V_{C_{S2}} + V_{CM} \end{aligned} \quad (2.28)$$

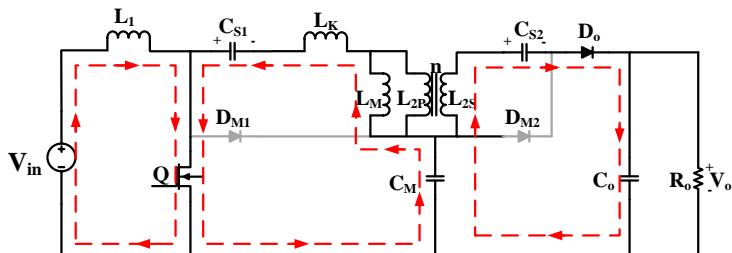
Substitusi persamaan 2.25 pada 2.28, maka akan didapatkan persamaan 2.29.

$$V_O = n \cdot V_{C_{S1}} + V_{C_{S2}} + V_{CM} \quad (2.29)$$



**Gambar 2.10** Mode Operasi IV [ $t_3$ - $t_4$ ]

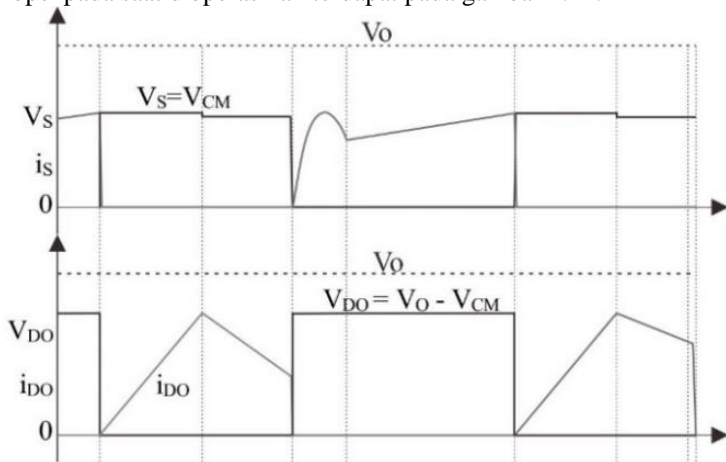
Pada mode operasi IV sakelar  $Q$  terbuka pada  $t_3$ - $t_4$ . Saat awal  $t_3$ , transfer energi ke  $C_M$  telah selesai dan dioda  $D_{M1}$  *reverse biased*. Karena masih terjadi transfer energi ke resistor beban  $R_O$ , sehingga dioda  $D_O$  masih dalam mode *forward biased*. Transfer energi terjadi hingga awal  $t_4$ , yaitu saat sakelar  $Q$  tertutup kembali.



**Gambar 2.11** Mode Operasi V [ $t_4$ - $t_5$ ]

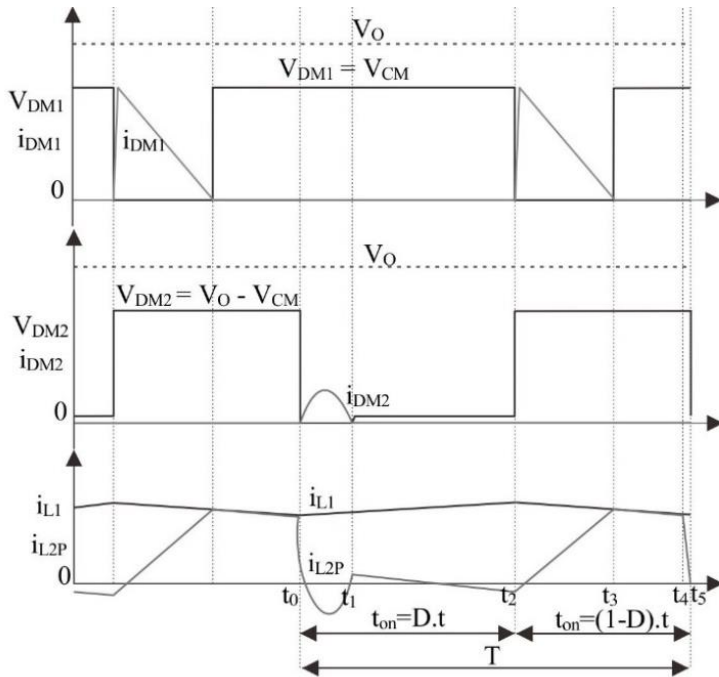
Pada mode operasi V, sakelar Q terbuka pada awal  $t_4$  dan tertutup pada awal  $t_5$ . Dioda  $D_{M1}$  dan dioda  $D_{M2}$  dalam mode *reverse biased*. Arus pada dioda  $D_O$  secara perlahan akan berkurang dan *reverse recovery time* ( $di/dt$ ) dibatasi oleh adanya induktansi bocor [4]. Hal ini dapat mengurangi rugi-rugi *reverse recovery current* pada dioda  $D_O$ . Kemudian, saat dioda  $D_O$  *reverse biased*, maka konverter kembali pada mode pertama.

Bentuk gelombang arus dan tegangan pada masing-masing komponen konverter DC - DC topologi *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel pada saat dioperasikan terdapat pada gambar 2.12.



**Gambar 2.12** Bentuk Tegangan dan Arus pada saklar dan dioda Konverter *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel





**Gambar 2. 13** Bentuk Tegangan dan Arus pada saklar dan dioda dan arus induktor Konverter *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel

Gambar 2.12 dan 2.13 merupakan gelombang tegangan dan arus komponen pensakelaran, tegangan dan arus dioda serta arus induktor, saat saklar Q terbuka dan tertutup. Dapat diamati dari waktu  $t_0$ - $t_5$  nilai arus dan tegangan saklar menunjukkan mode saklar saat terbuka dan tertutup. Mode saklar yang terus berubah menyebabkan pengisian muatan dan pengosongan muatan pada komponen induktor dan kapasitor. Akibat pengisian dan pengosongan ini maka terdapat *ripple* tegangan kapasitor dan *ripple* arus induktor.

*Duty cycle* adalah perbandingan nilai antara waktu saklar tertutup ( $t_{on}$ ) dengan periode pensakelaran ( $T$ ). Persamaan *duty cycle* adalah sebagai berikut:

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$t_{on} = D.T \quad (2.30)$$

Periode adalah penjumlahan waktu sakelar terbuka ( $t_{off}$ ) dan tertutup ( $t_{on}$ ), yaitu waktu untuk membentuk satu gelombang penuh, seperti pada persamaan 2.31.

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (2.31)$$

Dengan substitusi persamaan 2.30 pada persamaan 2.31, maka didapat persamaan waktu sakelar terbuka ( $t_{off}$ ) yaitu seperti pada persamaan 2.32.

$$\begin{aligned} T &= T.D + t_{off} \\ t_{off} &= T - T.D \\ t_{off} &= (1 - D) \cdot T \end{aligned} \quad (2.32)$$

### 2.3.2 Penurunan Persamaan Rasio Konversi

Perbandingan tegangan keluaran dan tegangan masukan konverter, disebut juga sebagai rasio konversi atau *gain*, yang mana dapat dianalisis menggunakan analisis persamaan yang didapat saat analisis konverter mode *steady state*.

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.21 ke persamaan 2.24 maka akan didapat persamaan  $V_{CM}$  terhadap  $V_{in}$ , yaitu seperti pada persamaan 2.33.

$$\begin{aligned} V_{CM} &= V_{in} + L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L_1}}{t_{off}} \\ V_{CM} &= V_{in} + V_{in} \cdot \frac{t_{on}}{t_{off}} \\ V_{CM} &= V_{in} \left( 1 + \frac{DT}{(1 - D)T} \right) \\ V_{CM} &= V_{in} \left( \frac{1 - D + D}{1 - D} \right) \\ V_{CM} &= \left( \frac{1}{1 - D} \right) V_{in} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Selanjutnya adalah mensubstitusikan persamaan 2.25 ke persamaan 2.22 untuk mendapatkan persamaan  $V_{CS1}$  terhadap  $V_{CM}$ , yaitu seperti pada persamaan 2.34.

$$\begin{aligned}
V_{CM} &= L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{t_{on}} + V_{C_{S1}} \\
V_{CM} &= V_{C_{S1}} \left( \frac{t_{off}}{t_{on}} \right) + V_{C_{S1}} \\
V_{CM} &= V_{C_{S1}} \left( \frac{(1-D)T}{DT} \right) + V_{C_{S1}} \\
V_{CM} &= V_{C_{S1}} \left( \frac{1-D}{D} + 1 \right) \\
V_{CM} &= V_{C_{S1}} \left( \frac{1-D+D}{D} \right) \\
V_{CM} &= V_{C_{S1}} \left( \frac{1}{D} \right) \\
V_{C_{S1}} &= D \cdot V_{CM} \tag{2.34}
\end{aligned}$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.33 pada persamaan 2.34, maka akan didapat persamaan  $V_{C_{S1}}$  terhadap  $V_{in}$ , yaitu seperti pada persamaan 2.35.

$$\begin{aligned}
V_{C_{S1}} &= D \cdot \left( \frac{1}{1-D} \right) \cdot V_{in} \\
V_{C_{S1}} &= \left( \frac{D}{1-D} \right) \cdot V_{in} \tag{2.35}
\end{aligned}$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan 2.23 pada persamaan 2.27, sehingga didapatkan persamaan  $V_{C_{S2}}$  terhadap  $V_{L_{2P_{on}}}$ , yaitu pada persamaan 2.36.

$$\begin{aligned}
V_{C_{S2}} &= L_{2S} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2S}}}{t_{on}} \\
V_{C_{S2}} &= n \cdot V_{L_{2P_{on}}} \tag{2.36}
\end{aligned}$$

Dilakukan analisis tegangan induktor  $L_{2P}$  pada persamaan 2.25 menjadi persamaan 2.37 dan persamaan 2.36 menjadi persamaan 2.38.

$$V_{C_{S1}} = L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{t_{off}}$$

$$L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{T} = (1 - D) \cdot V_{C_{S1}} \quad (2.37)$$

$$V_{C_{S2}} = n \cdot V_{L_{2P_{on}}}$$

$$V_{C_{S2}} = n \cdot L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{DT}$$

$$L_{2P} \cdot \frac{\Delta I_{L_{2P}}}{T} = \frac{V_{C_{S2}} \cdot D}{n} \quad (2.38)$$

Kemudian analisis *voltage second-balance* agar didapatkan persamaan  $V_{C_{S2}}$  terhadap  $V_{C_{S1}}$  (2.39).

$$(1 - D) \cdot V_{C_{S1}} = \frac{V_{C_{S2}} \cdot D}{n}$$

$$V_{C_{S2}} = (1 - D) \cdot \frac{n}{D} \cdot V_{C_{S1}} \quad (2.39)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.35 pada persamaan 2.39, maka akan didapatkan fungsi  $V_{C_{S2}}$  terhadap  $V_{in}$  (2.40).

$$V_{C_{S2}} = (1 - D) \cdot \frac{n}{D} \cdot \left( \frac{D}{1 - D} \right) \cdot V_{in}$$

$$V_{C_{S2}} = n \cdot V_{in} \quad (2.40)$$

Untuk mendapatkan rasio konversi, maka dilakukan substitusi persamaan 2.33, persamaan 2.35, dan persamaan 2.40 pada persamaan 2.28.

$$V_O = n \cdot V_{C_{S1}} + V_{C_{S2}} + V_{CM}$$

$$V_O = n \cdot \left( \frac{D}{1 - D} \right) \cdot V_{in} + n \cdot V_{in} + \left( \frac{1}{1 - D} \right) \cdot V_{in}$$

$$\frac{V_O}{V_{in}} = \frac{n \cdot D}{1 - D} + \frac{n(1 - D)}{1 - D} + \frac{1}{1 - D}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n+1}{1-D} \quad (2.41)$$

Persamaan 2.41 merupakan rasio konversi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel. Besar tegangan keluaran tergantung pada *duty cycle* dan perbandingan belitan induktor terkopel ( $n$ ). Dengan nilai  $n$  yang sama, semakin besar *duty cycle* maka semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan. Persamaan 2.41 juga dapat ditulis sebagai persamaan *duty cycle* terhadap tegangan masukan dan keluaran, yaitu sebagai berikut:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \cdot (1+n) \quad (2.42)$$

### 2.3.3 Penurunan Parameter Komponen

Berdasarkan gambar 2.6, konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel menggunakan beberapa komponen yaitu induktor, kapasitor, dioda dan sakelar. Dalam mendesain konverter, maka terlebih dahulu harus diketahui persamaan parameter komponen untuk menentukan nilai komponen yang diperlukan. Komponen tersebut diantaranya adalah induktor  $L_1$ , induktor terkopel  $L_2$ , kapasitor  $C_{S1}$ , kapasitor  $C_{S2}$ , kapasitor  $C_M$  dan resistor beban  $R_O$ . Perhitungan parameter komponen pertama yang akan dicari adalah parameter induktor  $L_1$  dan  $L_2$ .

Perhitungan komponen induktor  $L_1$  dilakukan saat sakelar  $Q$  tertutup. Saat sakelar tertutup, maka terjadi pengisian muatan pada induktor  $L_1$ , sesuai dengan persamaan 2.43.

$$V_{in} = V_{L_1} = L_1 \cdot \frac{di_{L_1}}{dt} \quad (2.43)$$

Analisis dilakukan saat sakelar tertutup, sehingga nilai  $dt = t_{on}$ .  $di_{L_1}$  merupakan nilai *ripple* arus yang melewati induktor  $L_1$ , yaitu  $\Delta I_{L_1}$ .  $\Delta I_{L_1}$  merupakan hasil perkalian dari faktor *ripple* ( $\lambda$ ) dengan arus yang mengalir pada induktor  $L_1$  ( $i_{L1}$ ).

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{\Delta I_{L_1}}{t_{on}} = \frac{\lambda \cdot i_{L_1}}{D \cdot T} \quad (2.44)$$

Maka akan didapatkan nilai induktansi induktor  $L_1$  dengan melakukan substitusi persamaan 2.44 pada persamaan 2.43.

$$V_{in} = L_1 \cdot \frac{\chi \cdot i_{L_1}}{D \cdot T}$$

$$L_1 = \left( \frac{D \cdot T}{\chi \cdot i_{L_1}} \right) \cdot V_{in} \quad (2.45)$$

Nilai  $i_1$  merupakan hasil pembagian daya masukan ( $P_{in}$ ) dengan tegangan masukan ( $V_{in}$ ). Nilai periode ( $T$ ) sama dengan  $1/f$ , dimana  $f$  merupakan frekuensi pensakelaran. Sehingga persamaan 2.45 dapat berubah menjadi persamaan 2.46 seperti di bawah ini.

$$L_1 = \left( \frac{D}{\chi \cdot \frac{P_{in}}{V_{in}} \cdot f} \right) \cdot V_{in}$$

$$L_1 = \frac{(V_{in})^2 \cdot D}{\chi \cdot P_{in} \cdot f} \quad (2.46)$$

Pada desain konverter DC - DC *SEPIC* induktor terkopel, ditentukan bahwa nilai induktor  $L_1$  sama dengan nilai induktor  $L_{2P}$  [4], seperti pada persamaan 2.47.

$$L_1 = L_{2P} = \frac{(V_{in})^2 \cdot D}{\chi \cdot P_{in} \cdot f} \quad (2.47)$$

Nilai induktansi  $L_{2S}$  dihitung berdasarkan perbandingan belitan sekunder dan belitan primer ( $n$ ) berdasarkan persamaan 2.48.

$$L_{2S} = n^2 \cdot L_{2P} \quad (2.48)$$

Nilai induktansi magnetik  $L_m$  dihitung berdasarkan persamaan 2.18.

Komponen kedua yang akan dihitung nilainya adalah kapasitor  $C$  yang dirumuskan pada persamaan 2.49.

$$V_{CM} = \frac{1}{C_M} \int I_{CM} \cdot dt$$

$$dV_{CM} \cdot C_M = I_{CM} \cdot dt$$

$$\Delta V_{CM} \cdot C_M = I_{CM} \cdot T$$

$$C_M = \frac{I_{CM}}{\Delta V_{CM} \cdot f} \quad (2.49)$$

Saat sakelar tertutup, besar arus  $I_{CM}$  sama dengan nilai arus keluaran  $I_{out}$  dikalikan dengan perbandingan belitan sekunder dan primer ( $n$ ). Rumus perhitungan kapasitor  $C_M$ ,  $C_{S1}$  dan  $C_{S2}$  adalah sama [4]. Sehingga persamaan 2.49 dapat dituliskan menjadi:

$$C_M = C_{S1} = C_{S2} = \frac{I_{out} \cdot n}{\Delta V_C \cdot f} \quad (2.50)$$

Nilai kapasitor  $C_O$  dihitung berdasarkan persamaan 2.51.

$$\begin{aligned} \Delta Q_O &= C_O \cdot \Delta V_O \\ I_O \cdot \Delta t_{ON} &= C_O \cdot \Delta V_O \\ \frac{V_O}{R} \cdot DT &= C_O \cdot \Delta V_O \\ C_O &= \frac{D}{R \cdot f \cdot \frac{\Delta V_O}{V_O}} \end{aligned} \quad (2.51)$$

Resistor beban  $R_{out}$  dihitung menggunakan persamaan 2.52 berikut:

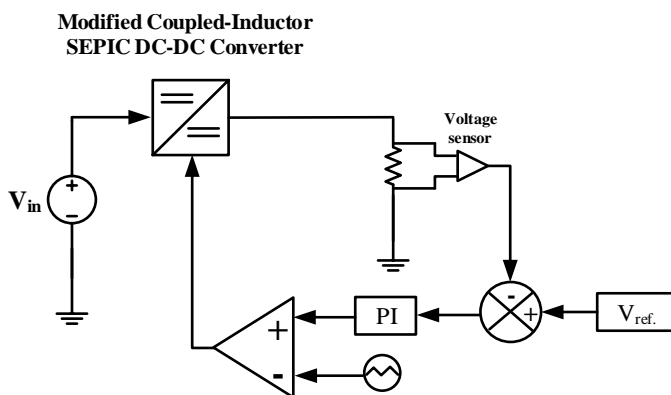
$$R_{out} = \frac{V^2}{P} \quad (2.52)$$

#### 2.3.4 Analisis Mode Dinamis

Mode dinamis merupakan mode ketika tegangan masukan konverter berubah-ubah dikarenakan arus masukan yang bersumber dari fotovoltaiik. Fotovoltaiik merupakan sumber arus, yang mana besarnya arus yang mengalir dari fotovoltaiik bergantung pada intensitas cahaya matahari serta temperatur fotovoltaiik. Semakin besar intensitas cahaya matahari, maka semakin besar arus yang dihasilkan fotovoltaiik. Sedangkan, berkebalikan dengan temperatur fotovoltaiik, apabila semakin tinggi temperaturnya, maka arus yang dihasilkan fotovoltaiik akan semakin kecil.

Gambar 2.13 merupakan diagram blok sistem saat mode dinamis. Tujuannya adalah untuk menjaga keluaran konverter agar konstan meski diberi arus masukan yang berubah-ubah. Cara menjaga agar tegangan keluaran bernilai konstan adalah dengan menggunakan

sensor tegangan kemudian akan dibaca oleh mikrokontroler yang nantinya akan diolah dan dihasilkan *duty cycle*. *Duty cycle* akan diatur dengan pengaturan umpan balik pengendali *Proportional-Integral* (PI) yang dapat menghitung dan meminimalisasi nilai selisih tegangan keluaran proses dan tegangan keluaran referensi yang diberikan pada sistem. Metode yang digunakan dalam penentuan nilai  $K_p$  dan  $K_i$  adalah *trial and error*.



**Gambar 2.14** Diagram Blok Sistem Saat Mode Dinamis



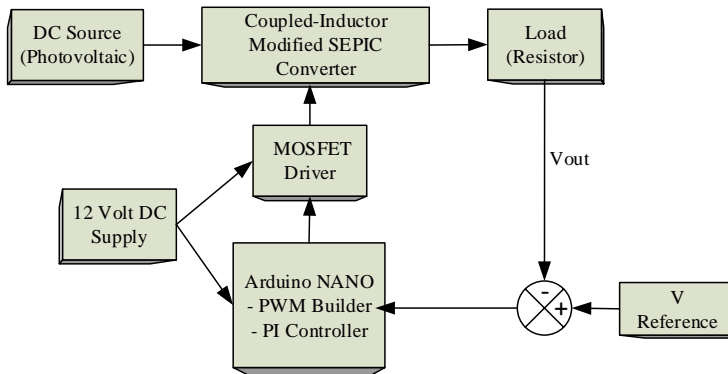
## BAB 3

### DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Pada bab 3 akan dibahas mengenai proses desain, simulasi dan implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel untuk aplikasi pada fotovoltaik. Proses desain meliputi perhitungan parameter komponen yang digunakan sesuai dengan persamaan pada bab 2. Kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi menggunakan PSIM untuk mengetahui apakah rangkaian *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dapat bekerja dengan baik dan sesuai dengan desain yang telah dibuat.

#### 3.1. Diagram Blok Sistem

Gambar 3.1 merupakan diagram blok sistem dari konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel.



**Gambar 3.1** Diagram Blok Sistem Konverter

Berdasarkan gambar 3.1, sumber DC yang digunakan ialah fotovoltaik yang mana telah dijelaskan pada bab 2 bahwa arus dari fotovoltaik bernilai fluktuatif tergantung dari intensitas penyinaran matahari dan temperatur panel. Dalam pengujian karakteristik gelombang masing-masing komponen pada konverter, digunakan *variable DC Supply* yang terdapat di laboratorium. Sinyal *switching* PWM dihasilkan menggunakan program Arduino NANO, yang mana sinyal *switching* tersebut memiliki amplitudo  $\pm 5$  Volt. *Driver* MOSFET berfungsi sebagai peningkat tegangan masukan pada *gate* MOSFET karena tegangan

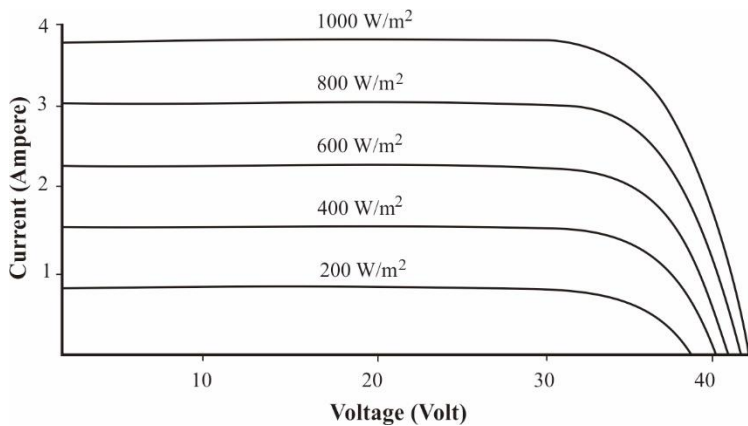
minimum untuk *trigger* MOSFET  $\pm 20$  Volt. Tegangan keluaran konverter dijaga konstan 340 Volt untuk masukan *grid-connected micro inverter* agar dapat dikonversi menjadi tegangan AC 220 V<sub>rms</sub>.

### **3.2. Modul Fotovoltaik sebagai Masukan Konverter DC - DC SEPIC Termodifikasi Induktor Terkopel**

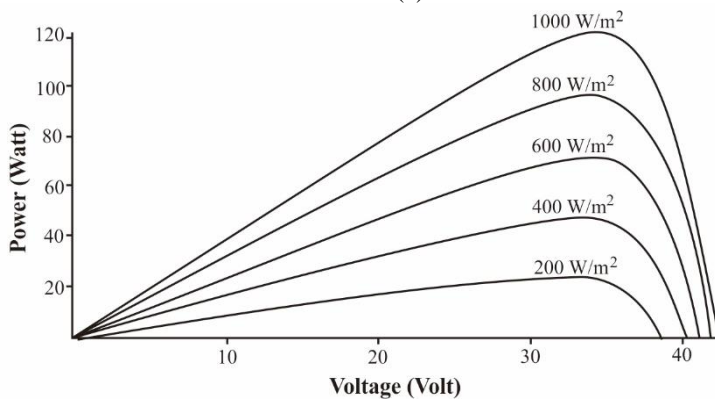
Sejumlah sel surya yang terhubung secara elektrik satu sama lain dan dipasang dalam struktur pendukung disebut modul fotovoltaik. Modul dirancang untuk memasok listrik pada tegangan DC tertentu seperti 12, 24 atau 48 Volt. Arus yang dihasilkan secara langsung tergantung pada seberapa banyak cahaya yang mengenai modul. Beberapa modul dapat dihubungkan bersama untuk membentuk sebuah *array*, yaitu dapat disusun secara seri atau paralel. Area yang lebih besar dari modul atau *array* akan menghasilkan lebih banyak listrik. Modul PV dinilai berdasarkan kekuatan yang diberikan dalam Standar Pengujian Mode (SPK) dari 1 kW/m<sup>2</sup> sinar matahari dan suhu sel fotovoltaik 25 derajat Celcius (°C). Keluaran SPK ini dinyatakan dalam bentuk "Watt peak" atau kapasitas nominal W<sub>p</sub> [12].

Pada gambar 3.2.a ditunjukkan kurva karakteristik V-I sebuah fotovoltaik pada level radiasi tertentu. Dari gambar 3.2.a dapat diketahui titik pertemuan arus maksimal dan tegangan maksimal, yang mana apabila dikalikan akan mendapatkan daya keluaran maksimal. Titik puncak ini disebut titik daya maksimum (*maximum power point*). Sedangkan pada gambar 3.2.b merupakan kurva karakteristik V-P sebuah fotovoltaik. Dari gambar 3.2.b dapat diketahui daya maksimal dengan level iradiasi tertentu. Semakin tinggi level radiasi, maka titik daya maksimum fotovoltaik akan semakin tinggi pula.

Modul fotovoltaik yang digunakan dalam implementasi penelitian ini bermerek Solare Modul 50 Watt. Tabel 3.1 di bawah menunjukkan spesifikasi modul fotovoltaik yang digunakan dalam pengujian. Dari tabel diketahui bahwa daya maksimum yang dihasilkan oleh modul tersebut sebesar 50 Watt pada tegangan nominal 17,6 Volt dan arus 2,85 Ampere. Sedangkan besarnya tegangan *open circuit* dan arus *short circuit* adalah 22,5 Volt dan 3,04 Ampere. Suhu kerja modul yang digunakan yaitu antara -40°C sampai dengan 80°C.



(a)



(b)

**Gambar 3.2** (a) Karakteristik V - I dan (b) V - P dari Fotovoltaik dengan Level Irradians Tertentu

**Tabel 3.1** Spesifikasi Modul Fotovoltaik yang digunakan dalam Pengujian

Parameter	Value
Name	Solar Module
Model	SP-50-M36
Maximum Power	50 Wp

**Tabel 3.1 (Lanjutan)** Spesifikasi Modul Fotovoltaik yang digunakan dalam Pengujian

Parameter	Value
Short circuit current	3,04 A
Current at maximum power	2,85 A
Open circuit voltage	22,5 V
Voltage at maximum power	17,6 V
Dimention	700*510*30
Temperature	-40 <sup>0</sup> C s.d 80 <sup>0</sup> C
Cell	36
Weight	5.5 kg

### 3.3. Desain Konverter DC - DC Topologi SEPIC Termodifikasi Induktor Terkopel

Dalam penentuan desain konverter, hal yang perlu diperhatikan adalah ketersediaan komponen di pasaran dan kesesuaian dengan *rating* peralatan uji di laboratorium agar dapat menunjang pengujian implementasi konverter. Penentuan parameter komponen juga harus memperhatikan kapasitas tegangan, arus dan daya dari komponen itu sendiri agar dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan desain. Pada tabel 3.2 berikut ini berisi mengenai parameter awal dalam mendesain rangkaian ini.

**Tabel 3.2** Spesifikasi Awal Desain Konverter

Parameter	Value
$P_{out}$	50 W
$V_{out}$	340 V
$V_{in}$	17 V
Switching Frequency	24 kHz
$n (N_{L2S}/N_{L2P})$	1.9
Ripple of $V_{CS1}$ and ripple of $V_{CM}$	2,98%
Ripple of $V_{CS2}$	10%
Ripple of $I_{in}$	24,7%
Ripple of $I_{L2}$	17%
Ripple of $V_O$	2%

*Range* nilai tegangan masukan ditentukan sebesar 15-17 Volt untuk mengatasi bila terjadi penurunan tegangan masukan. Frekuensi *switching* ditentukan 24 kHz untuk memperkecil nilai induktor  $L_1$  dan  $L_2$  ( $L_{2P}$  dan  $L_{2S}$ ). Daya keluaran ditentukan 50 Watt. Nilai  $n$  adalah perbandingan belitan sekunder dan belitan primer, ditentukan bernilai 1,9 untuk memperkecil nilai *duty cycle*. Nilai *ripple*  $V_C$  ditentukan berdasarkan pertimbangan ketersediaan kapasitor di pasaran. *Ripple*  $I_m$  ditentukan sebesar 24,7% dengan pertimbangan semakin besar nilai *ripple* maka akan memperkecil nilai induktansi.

### 3.3.1 Penentuan Nilai Beban

Konverter didesain untuk bekerja pada daya keluaran 50 Watt dengan tegangan keluaran 340 Volt. Berdasarkan persamaan 2.52 maka dapat dihitung nilai resistor  $R$  sebesar:

$$R_{out} = \frac{340^2}{50} = 2312 \Omega$$

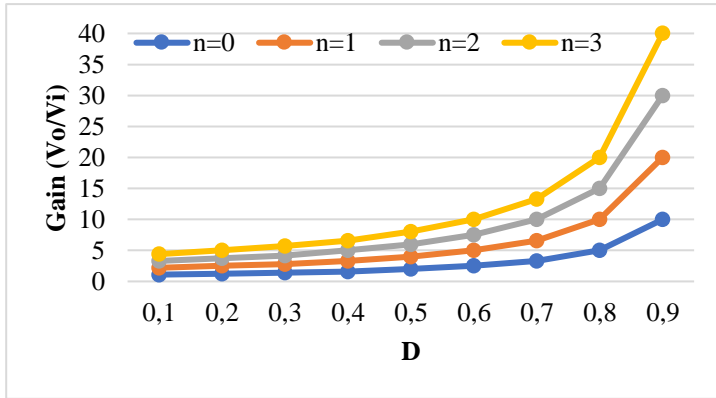
### 3.3.2 Penentuan Rasio Konversi dan *Duty Cycle*

Berdasarkan persamaan 2.41 pada bab 2, maka rasio konversi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel bergantung pada nilai *duty cycle* dan perbandingan induktor terkopel  $n$ . Tabel di bawah ini menunjukkan rasio konversi  $M$  dari konverter.

**Tabel 3.3** Hubungan *Duty Cycle* dan  $n$  Terhadap Nilai Rasio Konversi

n	<i>Duty Cycle</i>								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	1,1	1,25	1,42	1,6	2	2,5	3,3	5	10
1	2,2	2,5	2,8	3,3	4	5	6,6	10	20
2	3,3	3,75	4,2	5	6	7,5	10	15	30
3	4,4	5	5,7	6,6	8	10	13,3	20	40

Tabel 3.3 merupakan tabel rasio konversi berdasarkan nilai *duty cycle* dan perbandingan belitan sekunder dan primer induktor terkopel ( $n$ ). Dari tabel tersebut dapat diketahui karakteristik kurva rasio konversi berdasarkan *duty cycle* dan  $n$ . Dari data tersebut, dapat dipilih nilai  $n$  yang akan didesain dengan nilai rasio konversi yang dipilih. Pada gambar 3.3 merupakan grafik hubungan *duty cycle* dan  $n$  terhadap rasio konversi.



**Gambar 3.3** Grafik Rasio Konversi Konverter Berdasarkan Nilai *Duty Cycle* dan  $n$

Pada penelitian ini telah ditentukan besarnya tegangan keluaran 340 Volt dan *range* dari tegangan masukan yaitu 15-17 Volt. Perhitungan *duty cycle* menggunakan persamaan 2.42, didasarkan saat tegangan maksimum masukan konverter yaitu 17 Volt.

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{340}{17} = 20$$

$$D = 1 - \frac{17}{340} \cdot (1 + 1,9) = 0,856$$

Dan saat tegangan berada pada mode minimum, yaitu 15 Volt, maka nilai *duty cycle* konverter adalah:

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{340}{15} = 22,6$$

$$D = 1 - \frac{15}{340} \cdot (1 + 1,9) = 0,872$$

Sehingga dapat diketahui bahwa rentang kerja tegangan masukan inverter adalah 15-17 Volt, tegangan keluaran 340 Volt, *duty cycle* antara 0,856 - 0,872 dengan rasio konversi sebesar 20 kali hingga 22,6 kali dari tegangan masukan.

### 3.3.3 Penentuan Nilai Induktor $L_1$ dan Induktor Terkopel $L_2$

Nilai induktor  $L_1$  minimum dihitung berdasarkan persamaan 2.47 dan nilai induktansi minimum  $L_{2S}$  dihitung berdasarkan persamaan 2.48. Nilai induktansi  $L_1$  sama dengan nilai induktor  $L_2$ . Mode operasi konverter dihitung dalam mode CCM sehingga nilai arus induktor harus lebih dari nol, karena hal tersebut, maka nilai induktor pada persamaan 2.47 merupakan nilai minimum dari induktor.

$$L_1 = \frac{(V_{in})^2 \cdot D}{\chi \cdot P_{in} \cdot f}$$

$$L_1 = \frac{(17)^2 \cdot 0,856}{24,7\% \cdot 50 \cdot 24000} = 0,85 \text{mH}$$

$$L_{2P} = \frac{(V_{in})^2 \cdot D}{\chi \cdot P_{in} \cdot f} = \frac{(17)^2 \cdot 0,856}{17\% \cdot 50 \cdot 24000} = 1,3 \text{mH}$$

$$L_{2S} = n^2 \cdot L_{2P}$$

$$L_{2S} = 2^2 \cdot 1,2422 = 5 \text{ mH}$$

Kapasitas hantar arus induktor ditentukan berdasarkan besar arus yang mengalir pada kawat konduktor ketika konverter dibebani maksimum. Besar arus induktor  $L_1$  sama dengan arus masukan konverter pada beban sesuai desain, yaitu 50 Watt. Maka besar arus induktor  $L_1$  adalah sebagai berikut:

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{50}{17} = 2,94 \text{ A}$$

Dengan desain *ripple* arus sebesar 24,7%, maka besarnya arus maksimal pada induktor  $L_1$  dan  $L_2$  adalah:

$$I_{in \max} = 124,7\% \cdot 2,94 = 3,666 \text{ A}$$

Nilai induktansi bocor  $L_k$  dihitung menggunakan persamaan 2.17. Ditentukan nilai  $di/dt$  sebesar  $14 \text{ A}/\mu\text{s}$ .

$$L_k = \frac{V_{in}}{(1-D) \cdot \frac{di}{dt} \cdot n}$$

$$L_k = \frac{17}{(1-0,856) \cdot 14 \cdot 10^6 \cdot 1,9} = 0,005 \text{mH}$$

Nilai induktansi magnetisasi dihitung menggunakan rumus 2.18.

$$L_m = L_{2p} - L_k = 1,2422 - 0,0044 = 1,24 \text{ mH}$$

**Tabel 3.4** Parameter induktor  $L_1$  dan  $L_2$

Parameter	Nilai
$L_1$	0,85 mH
$L_{2P}$	1,3 mH
$L_{2S}$	5 mH
$L_k$	0,005 mH
$L_m$	1,24mH

### 3.3.4 Penentuan Nilai Kapasitor $C_{S1}$ , $C_{S2}$ , $C_M$ , dan $C_o$

Nilai kapasitor  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$ , dan  $C_M$  dihitung berdasarkan persamaan 2.50. Dalam penelitian ini, nilai  $C_{S1}$  sama dengan  $C_M$ . Nilai *ripple* tegangan  $C_{S1}$  dan  $C_M$  ditentukan sebesar 2,98 % atau sama dengan 3,526 Volt.

$$\Delta V_{CS1} = \Delta V_{CM} = \frac{V_i}{(1-D)} \cdot 2,98\%$$

$$\Delta V_{CS1} = \Delta V_{CM} = \frac{17}{(1-0,856)} \cdot 2,98\%$$

$$\Delta V_{CS1} = \Delta V_{CM} = 3,5\text{Volt}$$

Maka nilai  $C_M$  dan  $C_{S1}$  adalah seperti di bawah ini:

$$C_M = C_{S1} = \frac{I_{out} \cdot n}{\Delta V_{C_{CS1}} \cdot f} = \frac{0,147 \cdot 1,9}{3,526 \cdot 24000} = 3,3 \mu F$$

Ripple tegangan  $C_{S2}$  ditentukan sebesar 10%.

$$\Delta V_{CS2} = \frac{V_i}{(1-D)} \cdot 10\%$$

$$\Delta V_{CS2} = \frac{17}{(1-0,856)} \cdot 10\%$$

$$\Delta V_{CS2} = 11,8\text{Volt}$$

Maka nilai  $C_{S2}$  dihitung seperti di bawah ini:

$$C_{S2} = \frac{I_{out} \cdot n}{\Delta V_{C_{CS2}} \cdot f} = \frac{0,147 \cdot 1,9}{11,8 \cdot 24000} = 0,98 \mu F$$



Perhitungan kapasitor  $C_o$  adalah menggunakan persamaan 2.51. Nilai ripple  $V_o$  adalah 2%.

$$C_o = \frac{D}{R \cdot f \cdot \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

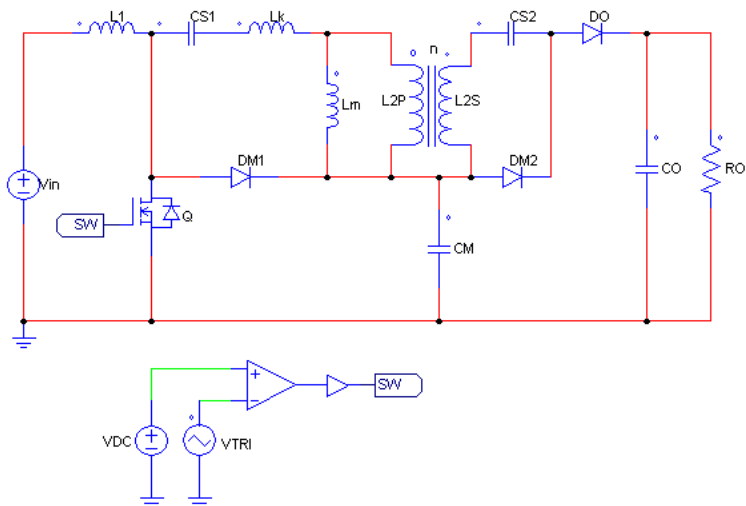
$$C_o = \frac{0,856}{2312 \cdot 24000 \cdot \frac{2}{100}}$$

$$C_o = 78 \mu F$$

Dipilih nilai kapasitor  $C_o$  yang terdapat di pasaran yang mendekati yaitu bernilai 100  $\mu F$ /400 V. Dengan *rating* tegangan 400 V, sehingga masih aman untuk *rating* tegangan keluaran 340 Volt.

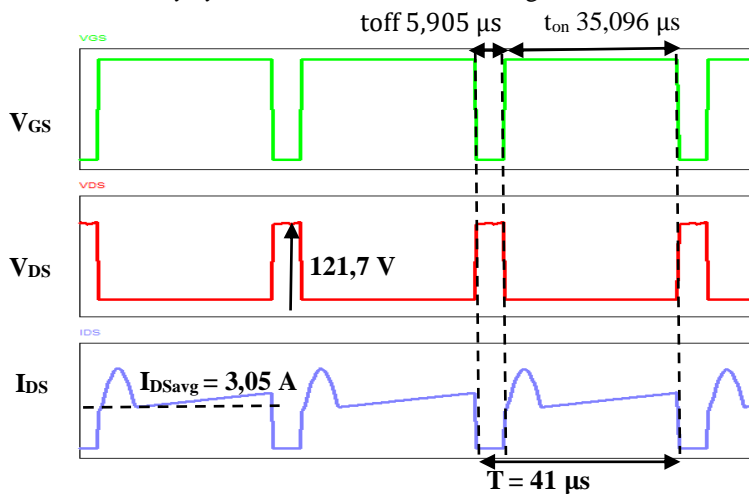
### 3.4. Simulasi Mode *Steady State* Konverter

Simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa desain konverter yang telah dibuat dapat bekerja sesuai dengan teori. Simulasi dicek pada mode *steady state* agar dapat dipastikan kinerja konverter saat sudah mencapai kondisi stabil. Simulasi rangkaian konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dilakukan menggunakan *software* PSIM. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada gambar 3.4, dan parameter yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.2 dan tabel 3.4.



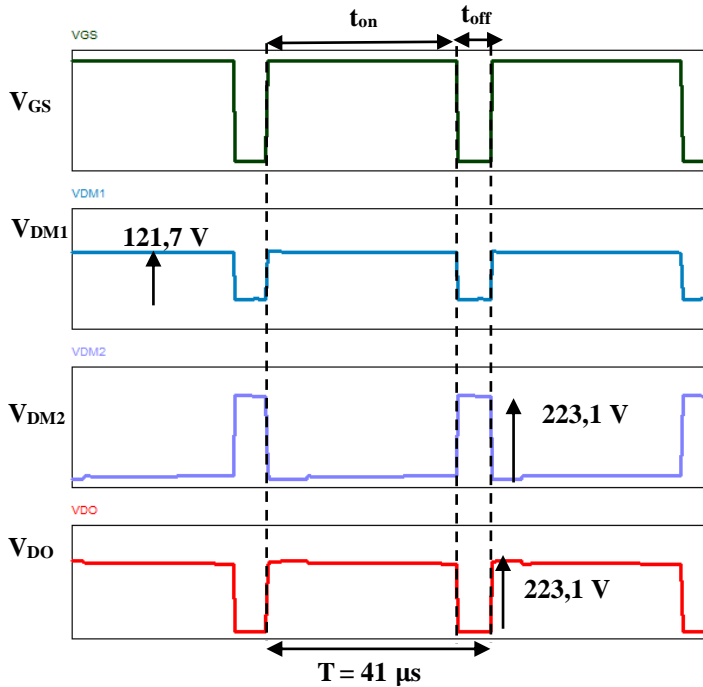
**Gambar 3.4** Simulasi Konverter Kondisi *Steady State*

Tegangan masukan simulasi bernilai konstan yaitu sebesar 17 Volt dan tegangan keluaran konstan sebesar 340 Volt dengan daya 50 Watt. Nilai *duty cycle* PWM sebesar 85,6% dengan frekuensi 24 kHz.



**Gambar 3.5** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$ , dan  $I_{DS}$  Simulasi

Gambar 3.5 merupakan hasil simulasi berupa sinyal tegangan GS, tegangan DS dan arus DS saat konverter bekerja. MOSFET akan konduksi saat terdapat beda potensial pada *Gate*. MOSFET akan konduksi selama rentang waktu 35,096  $\mu\text{s}$  dan akan mati selama rentang waktu 5,905  $\mu\text{s}$ . Nilai  $V_{DS\text{max}}$  bernilai 121,7 V dan  $I_{DS\text{avg}}$  bernilai 3,05 A. Hasil simulasi sesuai dengan perhitungan.

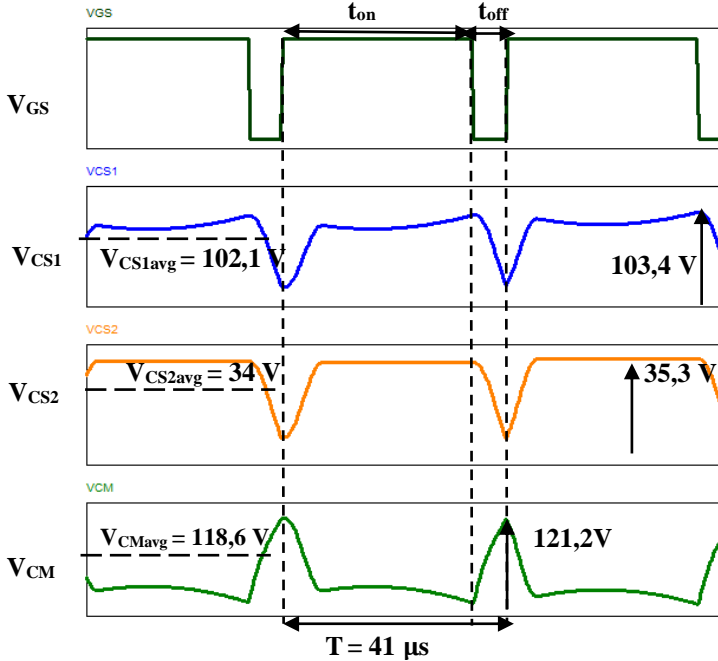


**Gambar 3.6** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{DM1}$ ,  $V_{DM2}$ , dan  $V_{DO}$  Simulasi

Pada gambar 3.6, saat sakelar konduksi, maka dioda  $D_{M1}$  dan  $D_O$  *reverse biased*, sedangkan  $D_{M2}$  mengalami *forward biased*. Kemudian saat sakelar mati, maka dioda  $D_{M1}$  dan  $D_O$  *forward biased*, sedangkan  $D_{M2}$  mengalami *reverse biased*. Hal ini sesuai dengan mode konverter yang telah dijelaskan pada bab 2. Tegangan  $V_{DM1\text{max}}$  bernilai 120,87 V,  $V_{DM2\text{max}}$  bernilai 223,1 V, serta  $V_{DO\text{max}}$  bernilai 223,1 V. Nilai  $V_{DM1\text{max}}$  pada gambar 3.6 sama dengan nilai  $V_{DS}$  pada gambar 3.5. Yang mana hasil simulasi sesuai dengan teori, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{DS} = V_{DM1} = \frac{V_i}{1-D} \quad (3.1)$$

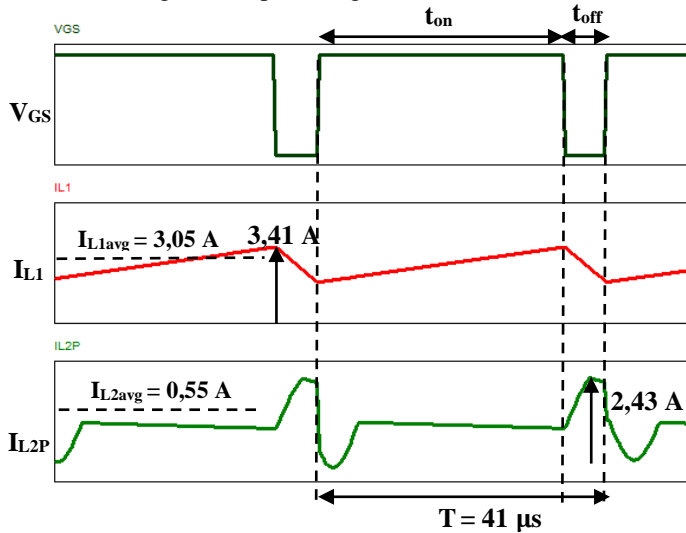
$$V_{DO} = V_{DM2} = V_O - V_{CM} = \frac{n \cdot V_i}{1-D} \quad (3.2)$$



**Gambar 3.7** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{CS1}$ ,  $V_{CS2}$ , dan  $V_{CM}$  Simulasi

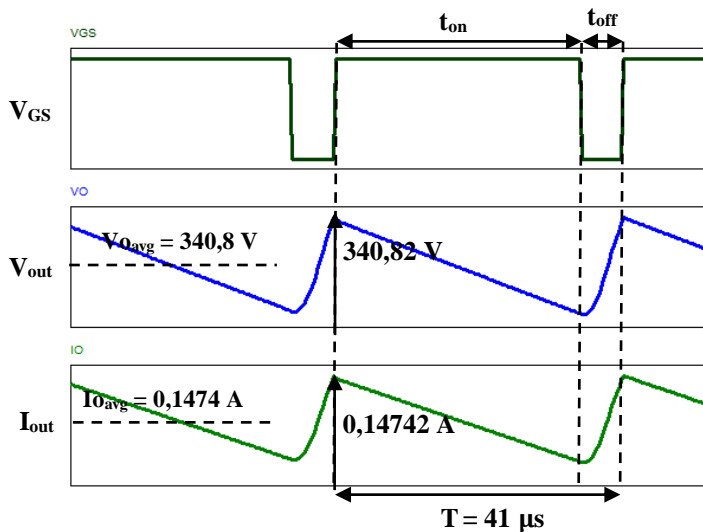
Pada gambar 3.7 dapat dilihat karakteristik gelombang  $V_{CS1}$ ,  $V_{CS2}$ , dan  $V_{CM}$  saat sakelar mode konduksi dan terbuka yang ditunjukkan oleh  $V_{GS}$ . Pada gambar terlihat bahwa saat sakelar konduksi,  $C_{S1}$  dan  $C_{S2}$  mengalami pengisian muatan (*charging*) karena nilai  $V_{CS1}$  dan  $V_{CS2}$  mengalami kenaikan. Sedangkan disaat yang bersamaan,  $C_M$  mengalami pengosongan muatan (*discharging*). Hal ini sesuai dengan prinsip operasi konverter yang telah dijelaskan pada bab 2. Saat sakelar terbuka, maka terjadi *discharging* pada  $C_{S1}$  dan  $C_{S2}$ , sedangkan  $C_M$  mengalami mode *charging*. Nilai  $V_{CS1max}$ ,  $V_{CS2max}$ , dan  $V_{CMmax}$  berturut-turut adalah  $103,4 \text{ V}$ ;  $35,3 \text{ V}$ ; dan  $121,2 \text{ V}$ . Nilai *ripple*  $V_{CS1}$ ,  $V_{CS2}$ , dan  $V_{CM}$  berturut-turut adalah  $3,43\%$ ;  $3,8\%$ ; dan  $3,38\%$ . Nilai ini sesuai dengan perhitungan

*ripple* ketiga kapasitor tersebut. Dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi telah sesuai dengan hasil perhitungan.



**Gambar 3.8** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $I_{L1}$ , dan  $I_{L2}$  Simulasi

Gambar 3.8 menunjukkan hasil simulasi konverter yaitu gelombang  $I_{L1}$  dan  $I_{L2P}$  saat sakelar konduksi dan terbuka yang ditunjukkan oleh gelombang  $V_{GS}$ . Saat sakelar konduksi, terjadi proses *charging* pada  $L_1$  dan proses *discharging* pada  $L_2$ . Dan saat sakelar terbuka, terjadi proses *discharging* pada  $L_1$  dan proses *charging* pada  $L_2$ . Dari hasil simulasi, didapatkan nilai  $I_{L1max}$  sebesar 3,41 A,  $I_{L2Pmax}$  sebesar 2,43 A,  $I_{L1avg}$  sebesar 3,05 A dan  $I_{L2Pavg}$  sebesar 0,55 A. Hasil simulasi telah sesuai dengan perhitungan.

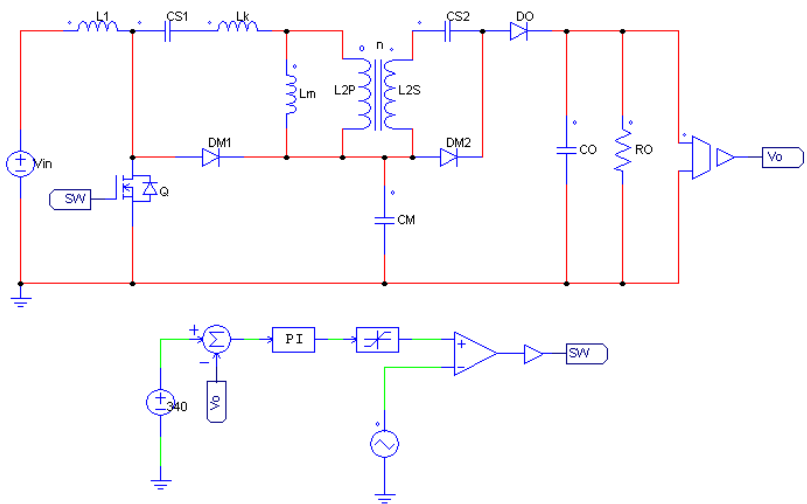


**Gambar 3.9** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_O$ , dan  $I_O$  Simulasi

Gambar 3.9 menunjukkan hasil simulasi konverter yaitu tegangan  $V_O$  dan  $I_O$  pada pembebanan rating, yaitu 50 Watt dengan tegangan masukan 17 Volt. Tegangan dan arus keluaran mengalami kenaikan saat sakelar konduksi dan mengalami penurunan saat sakelar terbuka. Nilai  $V_{Omax}$  sebesar 340,82 V;  $V_{Oavg}$  340,8 V;  $I_{Omax}$  0,14742 A dan  $I_{Oavg}$  0,1474 A. Nilai *ripple*  $V_O$  sebesar 0,01% dan *ripple*  $I_O$  sebesar 0,013%. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa konverter telah bekerja sesuai dengan desain, yaitu memiliki kemampuan konversi tegangan sebesar 20 kali dari tegangan masukan.

### 3.5. Konverter pada Kondisi Dinamis

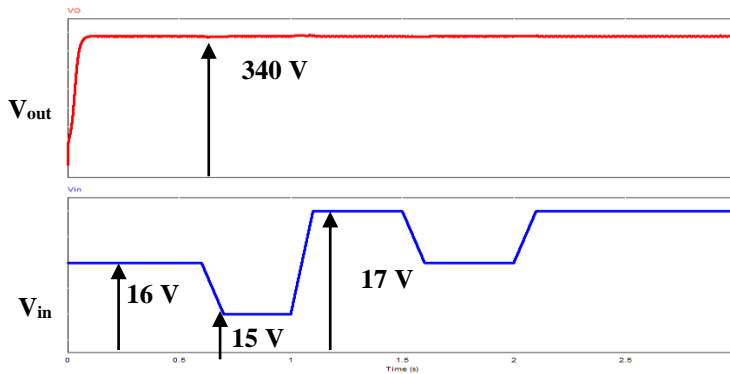
Pada saat kondisi dinamis, konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel harus dapat mempertahankan tegangan keluaran konstan 340 Volt. Saat tegangan masukan berubah-ubah, maka pengontrol *closed loop* akan bekerja mengontrol *duty cycle* konverter, yang mana pengontrol yang digunakan adalah pengontrol PI (*Proportional-Integrator*). Gambar 3.10 merupakan simulasi dari konverter dalam kondisi dinamis.



**Gambar 3.10** Simulasi Konverter Kondisi *Close Loop*

PI akan merespon berdasarkan *feedback* yang diberikan oleh sensor tegangan keluaran. Referensi pada PI diatur pada 340 Volt. Selisih antara tegangan *sensing* dan tegangan referensi akan dianggap *error* sehingga PI akan mengubah-ubah *duty cycle* sehingga nilai tegangan keluaran 340 Volt.

Pada gambar 3.11, dapat diamati respon PI terhadap perubahan tegangan masukan. Terlihat bahwa PI menjaga tegangan keluaran bernilai konstan 340 Volt dengan nilai tegangan masukan yang berubah-ubah.



**Gambar 3.11** Respon Pengontrol Akibat Perubahan Tegangan Input

### 3.6. Implementasi Konverter

Implementasi merupakan pembuatan konverter sesuai desain yang telah ditentukan, termasuk di dalamnya penentuan komponen yang digunakan, seperti kapasitor, dioda, MOSFET, serta pembuatan induktor dan induktor terkopel. Parameter komponen dibuat semirip mungkin dengan desain yang telah ditentukan agar konverter dapat bekerja secara maksimal.

#### 3.6.1 Induktor $L_1$ dan Induktor Terkopel $L_2$

Berdasarkan tabel 3.4, nilai induktor yang harus dibuat adalah  $L_1$  0,85 mH;  $L_{2P}$  1,3 mH;  $L_{2S}$  5 mH;  $L_k$  0,005 mH; dan  $L_m$  1,3 mH. Dengan  $I_{L1max}$  bernilai 3,66 A dan  $I_{L2max}$  bernilai 4,5 A.

Induktor  $L_1$  dengan arus maksimal 3,66 A dapat menggunakan kawat berdiameter 1,2 mm<sup>2</sup>. Namun dipilih kawat AWG dengan kuat hantar arus dua tingkat di atasnya atau 5,9 A, yaitu berdiameter 1,628 mm<sup>2</sup>. Pemilihan ini dilakukan karena faktor keamanan.

Kawat dipilin dengan tujuan untuk meningkatkan kuat hantar arus, mengurangi *skin effect*, mengurangi resistansi tembaga, dan meningkatkan elastisitas konduktor. Sehingga digunakan kawat berdiameter 0,45 mm<sup>2</sup> dengan kemampuan hantar arus maksimum 0,457 A dan frekuensi maksimum 85 kHz. Maka, jumlah pilinan yang diperlukan agar kawat berdiameter 0,45 mm<sup>2</sup> aman untuk menghantarkan arus maksimal hingga 5,9 A adalah sebanyak:



$$n_{\text{kawat}} = \frac{d_{I=5,9A}}{d_{\text{pilih}}} = \frac{1,628}{0,45} = 3,6 \approx 4$$

Sedangkan untuk induktor terkopel  $L_2$ , arus maksimum yang melewati konduktor adalah sebesar 2,6 A sesuai dengan kawat AWG dengan diameter 1,45 mm<sup>2</sup>. Namun dipilih kawat AWG dengan kuat hantar arus dua tingkat di atasnya atau 7,4 A, yaitu 1,82 mm<sup>2</sup> dengan frekuensi maksimum 5,3 kHz. Maka, jumlah pilinan yang diperlukan agar kawat berdiameter 0,45 mm<sup>2</sup> aman untuk menghantarkan arus maksimal hingga 7,4 A adalah sebanyak:

$$n_{\text{kawat}} = \frac{d_{I=7,4A}}{d_{\text{pilih}}} = \frac{1,82}{0,45} = 4,04 \approx 4$$

Setelah ditentukan jumlah pilinan kawat untuk  $L_1$  dan  $L_2$ , selanjutnya dilakukan pemilihan inti. Inti induktor yang digunakan harus cukup untuk menampung fluks yang dihasilkan sehingga inti tidak mengalami saturasi. Sehingga hal yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung jumlah belitan yang diperlukan berdasarkan parameter inti yang digunakan. Inti yang digunakan adalah ETD 49 dengan parameter seperti di bawah ini:

**Tabel 3.5** Parameter Inti Induktor [13]

Parameter	Nilai
$A_L$	6400 nH
$A_c$	354 mm <sup>2</sup>
$L_e$	124 mm
$\mu_e$	1780
$B_s$	320 mT

**Ket.**  $A_L$  : faktor induktansi  
 $A_C$  : luas penampang efektif inti  
 $L_e$  : panjang jalur efektif inti  
 $\mu_e$  : permeabilitas efektif relative  
 $B_s$  : kerapatan fluks magnet maksimal

Untuk mendapatkan nilai induktansi, maka digunakan persamaan sebagai berikut [14]:

$$L = A_L \cdot N^2 \quad (3.3)$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad (3.4)$$

Berdasarkan persamaan 3.4, diketahui bahwa jumlah belitan dipengaruhi induktansi  $A_L$  inti dan nilai induktansi yang diinginkan. Sehingga jumlah belitan  $L_1$ ,  $L_{2P}$ , dan  $L_{2S}$  adalah:

$$N_{L1} = \sqrt{\frac{0,8477 \cdot 10^{-3}}{6400 \cdot 10^{-9}}} = 11,5 \approx 12$$

$$N_{L2P} = \sqrt{\frac{1,2422 \cdot 10^{-3}}{6400 \cdot 10^{-9}}} = 13,93 \approx 14$$

$$N_{L2S} = \sqrt{\frac{4,9688 \cdot 10^{-3}}{6400 \cdot 10^{-9}}} = 27,86 \approx 28$$

Induktor  $L_1$  dibuat dengan melilitkan kawat secara langsung pada bobbin. Induktor terkopel  $L_2$  dibuat dengan melilitkan kawat primer pada lapisan bawah dan belitan kawat sekunder pada lapisan atas. Antara lapisan bawah dan atas terdapat isolasi sebagai pemisah antar belitan.

### 3.6.2 Kapasitor

Melalui perhitungan kapasitor pada subbab sebelumnya, diketahui nilai  $C_{S1}$  3,3  $\mu F$ ,  $C_M$  3,3  $\mu F$ , dan  $C_{S2}$  0,98  $\mu F$ . Nilai 3,3  $\mu F$  terdapat di pasaran, sedangkan 0,98  $\mu F$  tidak ada di pasaran, sehingga dipilih 1  $\mu F$ .

Tegangan kapasitor minimum yang harus dipenuhi adalah sesuai persamaan 2.33, 2.35 dan 2.40.

$$V_{CS1} = \left( \frac{D}{1-D} \right) \cdot V_{in}$$

$$V_{CS1} = \left( \frac{0,856}{1-0,856} \right) \cdot 17$$

$$V_{CS1} = 101,05 V$$

$$V_{CS2} = n \cdot V_{in}$$

$$V_{CS2} = 1,9 \cdot 17 = 32,3 V$$

$$V_{CM} = \left( \frac{1}{1-D} \right) \cdot V_{in}$$

$$V_{CM} = \left( \frac{1}{1-0,856} \right) \cdot 17$$

$$V_{CM} = 118 \text{ V}$$

$$V_{CO} = V_O = 340 \text{ V}$$

Kapasitor yang digunakan harus dapat menahan tegangan seperti pada perhitungan di atas. Karena itu digunakan kapasitor millar dengan rating 3,3  $\mu\text{F}/400 \text{ V}$  sebagai  $C_{S1}$  dan  $C_M$ . Serta kapasitor millar dengan rating 1  $\mu\text{F}/400 \text{ V}$  sebagai  $C_{S2}$ . Kapasitor  $C_O$  dipilih jenis millar dengan rating 100  $\mu\text{F}/400 \text{ V}$  agar aman digunakan dengan rating tegangan keluaran 340 V.

### 3.6.3 Penentuan Dioda $D_{M1}$ , $D_{M2}$ dan $D_O$

Dalam pemilihan dioda juga harus memperhatikan tegangan, arus dioda, dan waktu *reverse recovery* sehingga tidak mengalami kerusakan saat digunakan. Perhitungan arus pada dioda  $D_{M1}$ ,  $D_{M2}$ , dan  $D_O$  adalah sebagai berikut:

$$I_{DM1} = I_{in \max} = 3,6 \text{ A}$$

$$I_{DM2} = I_{L2S \max} = \frac{I_{L2P \max}}{n} = \frac{4,5}{1,9} = 2,36 \text{ A}$$

$$I_{DO} = I_O = 0,147 \text{ A}$$

Dengan menggunakan persamaan 3.1, maka didapatkan hasil perhitungan tegangan maksimum dioda adalah sebagai berikut:

$$V_{DM1} = \frac{V_i}{1-D} = \frac{17}{1-0,856} = 118,05 \text{ V}$$

$$V_{DO} = V_{DM2} = V_O - V_{CM} = \frac{n \cdot V_i}{1-D} = \frac{1,9 \cdot 17}{1-0,856} = 224,3 \text{ V}$$

Dari pertimbangan arus tersebut, dipilih dioda MUR 1560. Dioda MUR 1560 memiliki spesifikasi *DC Blocking Voltage* ( $V_R$ ) 600 V dan arus *forward* maksimal 30 A. Nilai maksimum waktu *reverse recovery* yang dimiliki juga cepat yaitu 60 ns, sehingga frekuensi

maksimumnya adalah 16 MHz. Karena itu dioda ini disebut sebagai dioda *ultrafast switching*.

### 3.6.4 Penentuan MOSFET

Dikarenakan konverter beroperasi dengan frekuensi pensakelaran 24 kHz, maka pemilihan MOSFET harus dipastikan dapat beroperasi pada frekuensi pensakelaran tersebut. Selain itu, MOSFET yang dipilih harus dapat menahan tegangan dan arus sesuai perhitungan, yaitu sebagai berikut:

$$V_{DS} = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{17}{1-0,856} = 118V$$

$$I_{DS_{max}} = I_{in} + I_{L2P} = 3,6 + 0,5 = 4,1A$$

MOSFET yang digunakan ialah IRFP4332 yang memiliki spesifikasi tegangan DS 300 V,  $R_{DS}$  29 m $\Omega$ , dan arus DS 40 A saat berada pada temperatur 100°C. Waktu *reverse recovery* IRFP4332 bernilai 290 ns, sehingga nilai frekuensi maksimumnya adalah 3,4 MHz.

### 3.6.5 Hasil Implementasi *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel

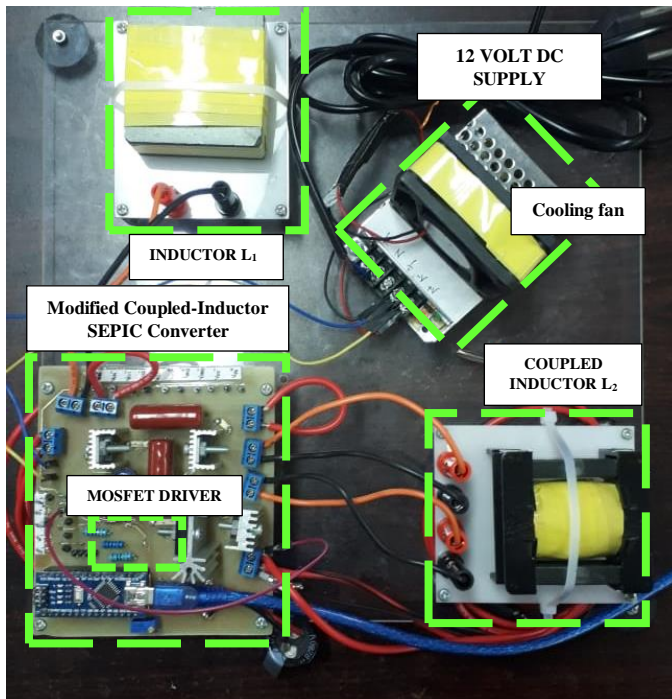
Berdasarkan perhitungan desain, maka komponen-komponen yang diperlukan untuk implementasi konverter *SEPIC* tertulis pada tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Komponen Implementasi *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel

Component	Value
Inductor $L_1$	0,8477 mH
Inductor $L_{2P}$	1,2422 mH
Inductor $L_{2S}$	4,9688 mH
$L_k$	0,0044 mH
$L_m$	1,2378 mH
Capacitor $C_{S1}$ dan $C_M$	3,3 $\mu$ F
Capacitor $C_{S2}$	1 $\mu$ F
Capacitor $C_O$	100 $\mu$ F
Diode $D_{M1}$ , $D_{M2}$ , dan $D_O$	MUR 1560
MOSFET	IRFP 4332
Microcontroller	Arduino Nano

Gate Driver	TLP 250
Gate Supply	12 V

Hasil implementasi konverter terlihat pada gambar 3.1. Pada konverter terdapat bagian-bagian berupa *Variable DC Supply*, induktor, induktor terkopel, konverter *SEPIC*, dan *Control Unit* (MOSFET driver dan Arduino Nano). Setiap komponen yang digunakan tentunya memiliki rugi-rugi karena tidak ada komponen yang ideal. Sehingga daya pada sisi keluaran akan bernilai lebih rendah dari daya masukan.



**Gambar 3.12** Hasil Implementasi Alat

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

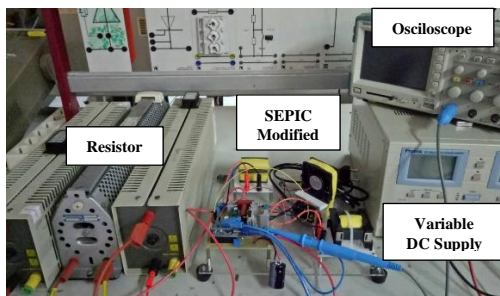
## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada bab 4 akan dibahas mengenai pengujian implementasi konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dan analisis data hasil pengujian tersebut. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah konverter telah bekerja sesuai desain. Pengujian yang dilakukan diantaranya adalah pengujian sinyal pensakelaran, pengujian tegangan dioda, pengujian arus induktor, pengujian tegangan kapasitor, pengujian tegangan keluaran konverter, pengujian rasio konversi, pengujian efisiensi, pengujian menggunakan modul fotovoltaik, dan pengujian respon dinamik konverter. Hasil dari pengujian selanjutnya akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil simulasi konverter menggunakan PSIM dan hasil perhitungan.

#### 4.1. Alat Pengujian Konverter

Digunakan peralatan yang terdapat di Laboratorium Konversi Energi untuk menguji konverter hasil implementasi. Pengujian dilakukan menggunakan tegangan masukan berupa *Variable DC Supply*. *Variable DC Supply* yang diparalel memiliki *rating* maksimal 30 Volt dan arus maksimal 10 Ampere. Tegangan masukan konverter sebesar 17 Volt. *Rheostat* dipasang secara seri sehingga bernilai 2312 Ohm, dengan arus maksimum pada *rheostat* sebesar 0,6 Ampere. Gelombang tegangan dan arus pada masing-masing komponen diamati menggunakan osiloskop yang tersedia di laboratorium.



**Gambar 4.1** Pengujian Modul Konverter DC - DC *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel

## 4.2. Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Komponen

Komponen-komponen pada rangkaian konverter harus diuji karakteristik gelombang arus dan tegangan untuk kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi dan perhitungan, sehingga didapatkan kesimpulan bahwa konverter telah bekerja sesuai desain atau tidak. Apabila karakteristik gelombang arus dan tegangan belum sesuai dengan simulasi, maka terdapat kesalahan saat pengimplementasian, sehingga perlu untuk dianalisa penyebabnya dan dicari solusinya. Pada subbab berikut ini adalah pengujian yang dilakukan.

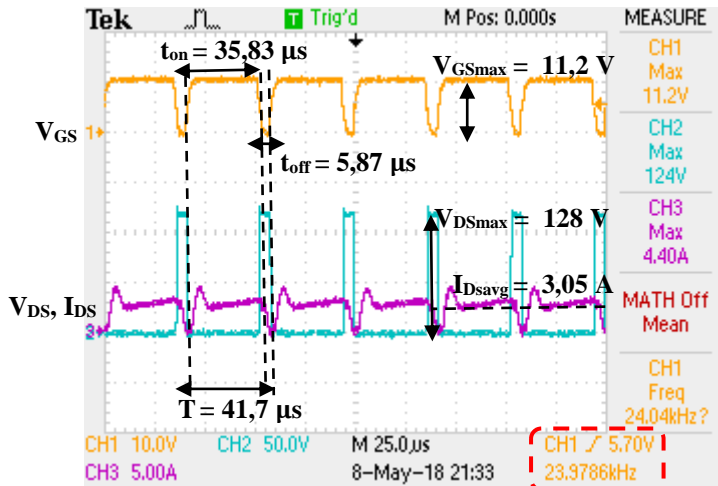
### 4.2.1 Pengujian Pensakelaran

Pengujian pensakelaran dilakukan untuk mengetahui apakah pembangkitan sinyal PWM sudah sesuai dengan frekuensi dan nilai tegangan yang diinginkan. Pengujian ini dilakukan dengan mengamati gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$  dan  $I_{DS}$ . Pada saat tegangan  $V_{GS}$  memiliki nilai tertentu, maka terdapat arus yang mengalir dari *Drain* ke *Source* atau dikatakan MOSFET konduksi. Dan pada saat tegangan  $V_{GS}$  bernilai nol, maka tidak ada arus yang mengalir dari *Drain* ke *Source* atau dikatakan MOSFET terbuka.

Pada hasil pengujian pensakelaran gambar 4.2, frekuensi *switching* bernilai 23,9786 kHz, yang mana nilai ini sudah sesuai dengan desain yang diinginkan, yaitu 24 kHz. Periode pensakelaran adalah 41,7  $\mu s$ , dengan waktu konduksi ( $t_{on}$ ) sebesar 35,83  $\mu s$  dan waktu sakelar terbuka ( $t_{off}$ ) sebesar 5,86  $\mu s$ . Nilai *duty cycle* implementasi lebih tinggi dari desain karena ketidakidealan komponen, sehingga dibutuhkan *duty cycle* yang lebih besar untuk mencapai tegangan keluaran 340 Volt yaitu 0,86, sedangkan *duty cycle* desain bernilai 0,856.

Pada pengujian, didapatkan nilai  $V_{GSmax}$  adalah 11,2 Volt, namun pada implementasi rangkaian *driver* MOSFET diberi tegangan masukan 12 Volt DC. Drop tegangan  $V_{GS}$  terjadi karena adanya ketidakidealan komponen. Nilai  $V_{DSmax}$  adalah 124 Volt, yang mana nilai saat simulasi adalah 121,7 Volt. Naiknya tegangan ini dikarenakan adanya resistansi pada *Drain-Source*. Nilai  $I_{DSavg}$  adalah 3,05 A yang mana nilai ini sudah sesuai dengan simulasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pensakelaran telah sesuai dengan desain yang diinginkan.



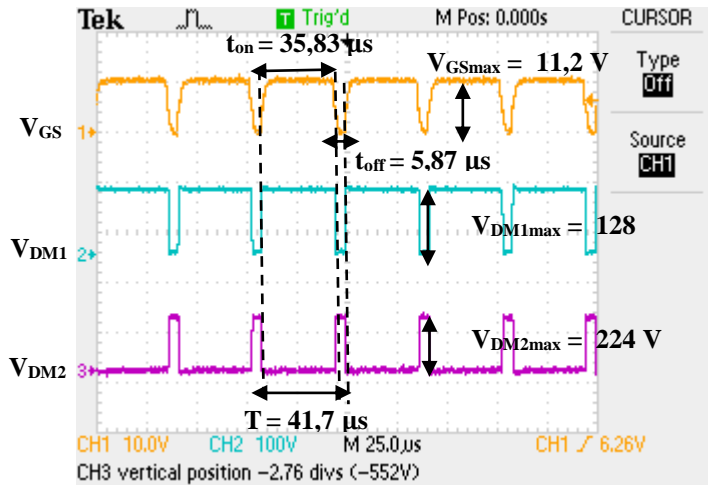


**Gambar 4.2** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$  dan  $I_{DS}$

#### 4.2.2 Pengujian Sinyal Pensakelaran pada Dioda

Pengujian sinyal pensakelaran pada dioda bertujuan untuk mengetahui apakah karakteristik gelombang tegangan dioda sesuai dengan simulasi atau tidak. Hasilnya terdapat pada gambar 4.3 dan 4.4.

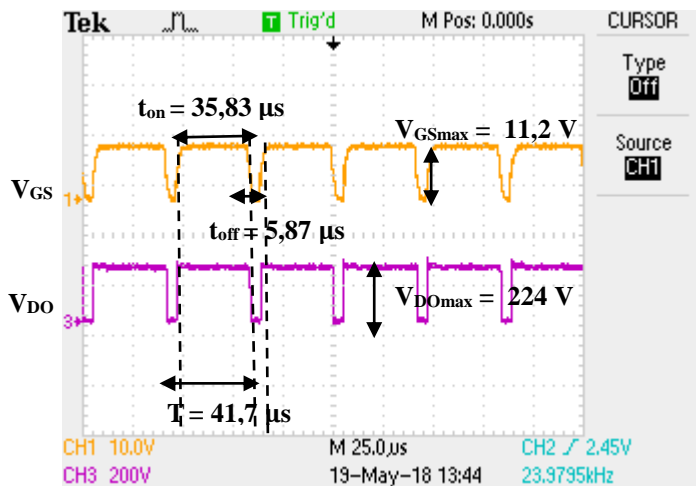
Terlihat pada gambar 4.3, bahwa saat MOSFET konduksi selama rentang waktu 35.82  $\mu s$ , dioda  $D_{M1}$  *reverse biased* dan dioda  $D_{M2}$  *forward biased*. Dan saat sakelar terbuka pada rentang waktu 5.87  $\mu s$ , dioda  $D_{M1}$  *forward biased* dan dioda  $D_{M2}$  *reverse biased*. Berdasarkan hasil pengujian, nilai  $V_{DM1max}$  dan  $V_{DM2max}$  berturut-turut adalah 128 Volt dan 224 Volt. Sedangkan pada simulasi,  $V_{DM1max}$  dan  $V_{DM2max}$  berturut-turut adalah 121,7 Volt dan 223,1 Volt. Terdapat selisih nilai implementasi dan simulasi dikarenakan adanya ketidakidealan komponen.



**Gambar 4.3** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{DM1}$ , dan  $V_{DM2}$

Pada simulasi dan implementasi,  $V_{DM1max}$  bernilai sama dengan nilai  $V_{DSmax}$ . Hal ini sesuai dengan hasil analisa mode operasi konverter yang mengatakan bahwa saat sakelar konduksi maka dioda  $D_{M1}$  *forward biased*, dan saat sakelar terbuka dioda  $D_{M1}$  *reverse biased*. Keduanya berada dalam satu *loop* yang sama namun bekerja pada mode yang berbeda.

Gambar 4.4 merupakan hasil pengujian sinyal pensakelaran pada dioda  $D_O$ . Berdasarkan hasil pengujian, saat sakelar konduksi selama rentang waktu  $35.82 \mu s$  dioda  $D_O$  *reverse biased*, dan saat sakelar terbuka pada rentang waktu  $5.87 \mu s$ , dioda  $D_O$  *forward biased*. Berdasarkan hasil pengujian, nilai  $V_{DOmax}$  adalah 224 Volt. Sedangkan pada simulasi,  $V_{DOmax}$  adalah 223,1 Volt.



**Gambar 4.4** Sinyal  $V_{GS}$  dan  $V_{DO}$

Tegangan  $V_{Domax}$  bernilai sama dengan  $V_{DM2max}$ . Hal ini karena keduanya berada dalam *loop* yang sama namun bekerja pada mode operasi yang berbeda. Saat sakelar konduksi, dioda  $D_{M2}$  *forward biased* dan dioda  $D_O$  *reverse biased*. Sedangkan saat sakelar terbuka, dioda  $D_{M2}$  *reverse biased* dan dioda  $D_O$  *forward biased*.

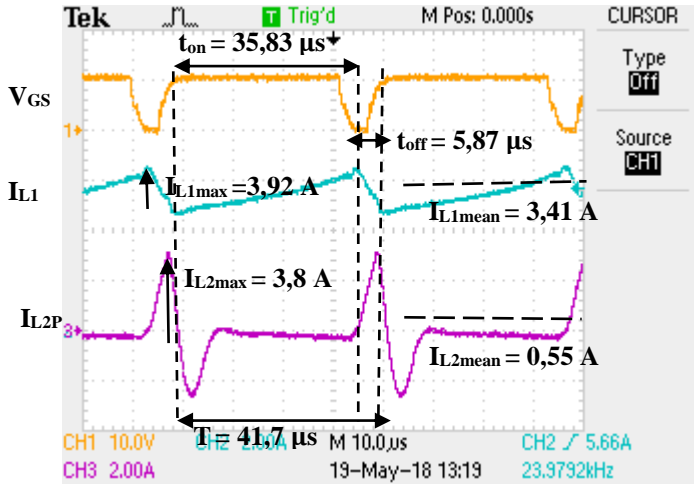
Dari hasil pengujian pensakelaran dioda  $D_{M1}$ ,  $D_{M2}$  dan  $D_O$ , ketiganya sudah memiliki karakteristik gelombang yang sama dengan simulasi, namun terdapat selisih nilai saat implementasi dan simulasi. Nilai tegangan maksimal implementasi lebih tinggi dikarenakan ketidakidealan komponen.

### 4.2.3 Pengujian Arus Induktor

Pengujian arus induktor bertujuan untuk mengetahui mode *charging-discharging* induktor berdasarkan waktu pensakelaran, yang hasilnya dibandingkan dengan hasil simulasi.

Dari hasil pengujian pada gambar 4.5, menunjukkan bahwa karakteristik sinyal tegangan  $V_{GS}$ , arus  $I_{L1}$  dan arus  $I_{L2P}$  hasil implementasi sudah sesuai dengan hasil simulasi. Saat sakelar konduksi dalam rentang waktu 35.82  $\mu s$ , induktor  $L_1$  dan  $L_2$  mengalami mode *charging*. Pembacaan amperemeter berkebalikan dengan arah  $I_{L2P}$ , sehingga pada gambar 4.5 arus induktot  $L_{2P}$  sebenarnya dalam kondisi

*charging*. Arus  $L_2$  mengalami ayunan pada awal  $t_{on}$  atau pada mode I dikarenakan pada mode I induktor terkopel  $L_2$  bertindak sebagai transformator. Yang mana terdapat induksi balik oleh belitan sekunder sehingga arus  $I_{L2P}$  bertambah besar.



**Gambar 4.5** Sinyal  $V_{GS}$ , arus  $I_{L1}$  dan arus  $I_{L2P}$

Saat sakelar terbuka pada rentang waktu  $5,87 \mu s$ , induktor  $L_1$  dan  $L_2$  mengalami mode *discharging*. Nilai  $I_{L1mean}$  adalah  $3,41 A$  dan  $I_{L2mean}$  adalah  $0,55 A$ . Apabila dijumlahkan, maka nilainya hampir sama dengan nilai  $I_{DSmean}$  yang mana hal ini sesuai dengan simulasi, karena  $I_{DS}$  merupakan penjumlahan dari  $I_{L1}$  dan  $I_{L2}$ .

Nilai  $I_{L1max}$  adalah  $3,92 A$  dan  $I_{L2max}$  adalah  $3,8 A$ . Nilai ini lebih tinggi dari hasil simulasi, yaitu  $I_{L1max | simulasi}$  bernilai  $3,41$  dan  $I_{L2max | simulasi}$  adalah  $2,43 A$ . Nilai arus yang lebih besar ini akan berpengaruh pada nilai *ripple*. Semakin besar arus yang melewati belitan induktor, maka akan membuat meningkatnya suhu inti yang berefek pada perubahan permeabilitas inti. Perubahan permeabilitas inti akan mempengaruhi perubahan nilai induktansi. Perubahan nilai induktansi dan rugi-rugi pada inti besi, fluks bocor dan rugi-rugi tembaga pada belitan induktor akan mempengaruhi hasil *ripple* pada induktor. Oleh karena itu, nilai *ripple* hasil implementasi akan lebih besar dari nilai *ripple* hasil simulasi.

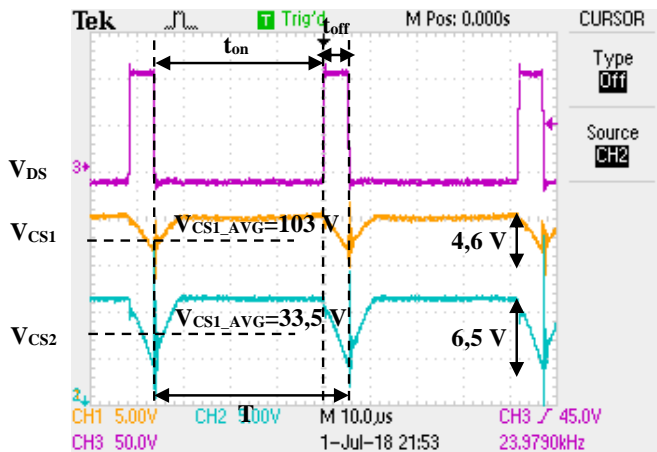
Dari hasil pengujian arus induktor, nilai *ripple* arus induktor  $L_1$  dan *ripple* arus induktor terkopel  $L_2$  bernilai lebih besar dari hasil

simulasi. Nilai *ripple*  $I_{L1}$  hasil implementasi sebesar 30% dan nilai *ripple*  $I_{L1}$  hasil simulasi sebesar 23%.

Dari hasil pengujian didapatkan kesimpulan bahwa karakteristik arus  $I_{L1}$  dan  $I_{L2}$  telah sesuai dengan hasil simulasi. Namun perbedaan nilai puncak, *mean* dan *ripple* antara implementasi simulasi dikarenakan ketidakidealan komponen.

#### 4.2.4 Pengujian Tegangan Kapasitor

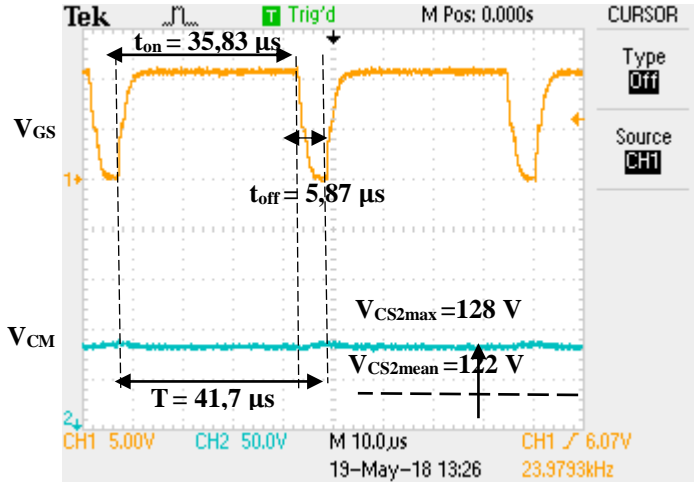
Pengujian tegangan kapasitor bertujuan untuk mengetahui karakteristik *charging* dan *discharging* kapasitor bersesuaian dengan mode sakelar yang sedang bekerja. Pengujian dilakukan pada tegangan masukan 17 Volt dan *duty cycle* 85,93%. Hasil pengujian tegangan kapasitor  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$  dan  $C_M$  ditampilkan pada gambar 4.6 dan 4.7.



**Gambar 4.6** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{CS1}$  dan  $V_{CS2}$

Berdasarkan hasil pengujian pada gambar 4.6, dapat diamati bahwa saat sakelar konduksi selama rentang waktu 35,83  $\mu s$  kapasitor  $C_{S1}$  dan  $C_{S2}$  mengalami mode *charging*. Sedangkan saat sakelar terbuka selama rentang 5,87  $\mu s$ , kapasitor  $C_{S1}$  dan  $C_{S2}$  mengalami mode *discharging*. Nilai  $V_{CS1max}$  adalah 107 V dan  $V_{CS2max}$  34 V. Nilai ini berbeda dengan hasil simulasi, yaitu  $V_{CS1max | simulasi}$  adalah 103,2 V dan  $V_{CS2max | simulasi}$  35,3 V. Pada implementasi konverter, *ripple*  $V_{CS1}$  sebesar 10,48% dan *ripple*  $V_{CS2}$  sebesar 36,04%. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi *ripple*  $V_{CS1}$  sebesar 3,43% dan *ripple*  $V_{CS2}$  sebesar 3,8%.

Perbedaan nilai tegangan dan *ripple* antara simulasi dan implementasi dikarenakan oleh ketidakidealan komponen serta adanya efek parasit komponen.



**Gambar 4.7** Sinyal  $V_{GS}$  dan  $V_{CM}$

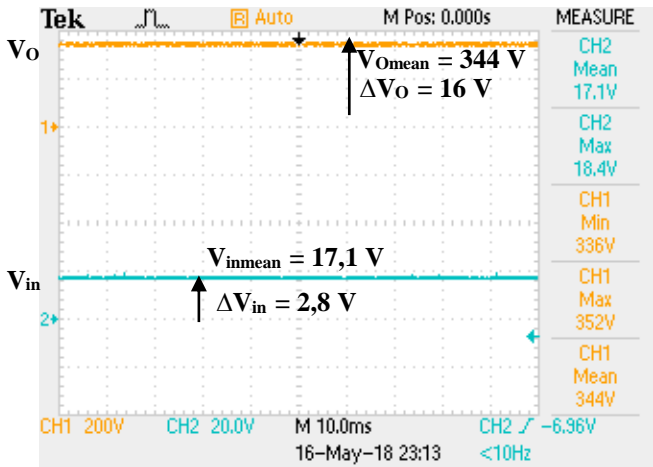
Dari hasil pengujian tegangan  $V_{GS}$  dan  $V_{CM}$  pada gambar 4.7 dapat diketahui karakteristik gelombang tegangan  $V_{CM}$  telah sesuai dengan hasil simulasi. Kapasitor  $C_M$  mengalami mode *discharging* saat sakelar konduksi selama rentang waktu 35,83  $\mu s$  dan mengalami mode *charging* saat sakelar terbuka selama rentang waktu 5,87  $\mu s$ . Berdasarkan hasil implementasi, didapatkan bahwa nilai  $V_{CS2max}$  adalah 128 V dan  $V_{CS2mean}$  adalah 122 V dengan *ripple*  $V_{CM}$  bernilai 6,6%. Hasil dari simulasi yaitu  $V_{CS2max} | \text{simulasi}$  adalah 121,2 V dan  $V_{CS2mean} | \text{simulasi}$  adalah 122 V dengan *ripple*  $V_{CM}$  bernilai 3,38%. Perbedaan nilai tegangan dan *ripple* antara simulasi dan implementasi disebabkan oleh adanya efek parasit komponen yaitu adanya resistansi dalam kapasitor. Karena dalam implementasi tidak ada komponen ideal, sedangkan saat simulasi komponen selalu bernilai ideal. Sehingga hal ini yang membuat nilai tegangan dan *ripple*  $V_{CM}$  lebih besar saat implementasi dibandingkan simulasi.

Dari analisa karakteristik tegangan kapasitor  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$  dan  $C_M$  dapat disimpulkan bahwa kapasitor telah bekerja sesuai dengan simulasi. Namun terdapat perbedaan nilai tegangan dan *ripple* implementasi

dibandingkan simulasi dikarenakan efek parasit komponen dan ketidakidealan komponen yang lain.

4.2.5 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran Konverter

Pengujian tegangan masukan dan keluaran konverter bertujuan untuk mengetahui apakah implementasi dapat menaikkan tegangan dari 17 Volt menjadi 340 Volt sesuai dengan desain yang telah dikerjakan, serta untuk membandingkan tegangan dan *ripple* antara hasil implementasi dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan dengan tegangan masukan 17 Volt dan *duty cycle* 85,93%. Hasil dari pengujian tegangan  $V_O$  dan  $V_{in}$  ditampilkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Sinyal  $V_O$  dan  $V_{in}$

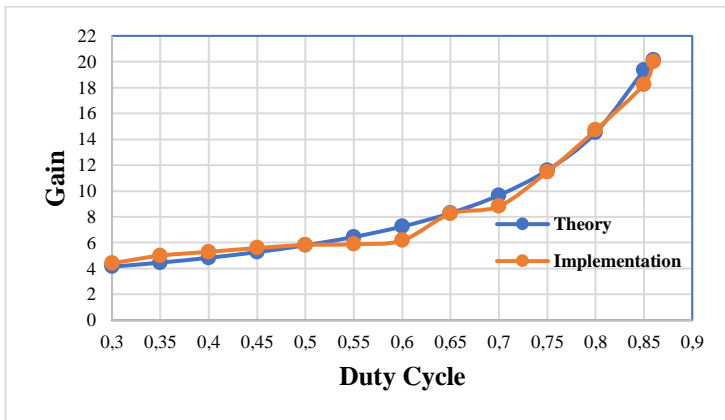
Gambar 4.8 di atas menunjukkan gelombang tegangan keluaran  $V_O$  dan tegangan masukan  $V_{in}$  hasil implementasi. Berdasarkan data yang diperoleh diketahui bahwa konverter dapat menaikkan tegangan dari 17 Volt menjadi 340 Volt pada *duty cycle* 85,93%.

Dari data pengujian didapatkan nilai seperti pada gambar 4.8. Nilai *ripple* tegangan  $V_O$  adalah 4,6% sedangkan *ripple* tegangan  $V_{in}$  adalah 16%. Dari hasil simulasi nilai tegangan  $V_{Omax}$  | simulasi adalah 340,82 V,  $V_{Omean}$  | simulasi adalah 340,8 V dan *ripple* sebesar 0,01%. Adanya perbedaan nilai simulasi dan implementasi disebabkan ketidakidealan komponen. Konverter telah berhasil dalam mengkonversi tegangan

masukan menjadi tegangan keluaran yang bernilai 20 kali tegangan masukan.

### 4.3. Pengujian Rasio Konversi

Pengujian rasio konversi bertujuan untuk mengetahui kemampuan konverter dalam menaikkan tegangan masukan berdasarkan perubahan nilai *duty cycle*. Tegangan masukan diatur konstan yaitu 17 Volt, beban diatur sebesar  $2312\ \Omega$ , serta nilai *duty cycle* diubah antara rentang 30% hingga 90%. Dari analisa rasio konversi pada bab 2, diketahui bahwa semakin besar nilai *duty cycle* maka akan didapatkan nilai tegangan keluaran yang semakin besar. Hasil pengujian rasio konversi dapat dilihat pada gambar 4.9.



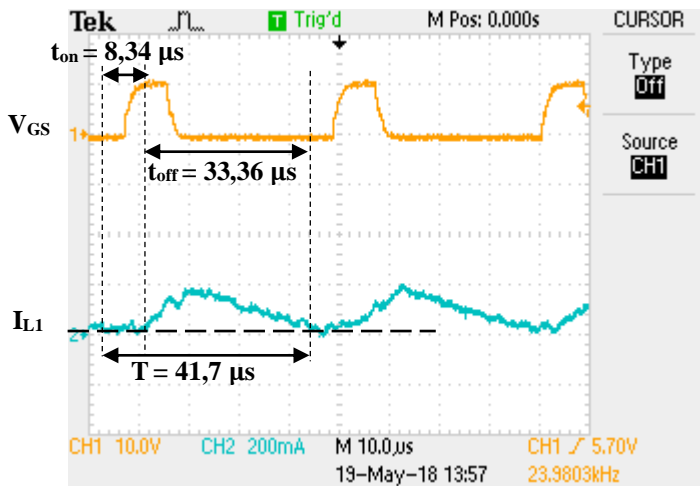
**Gambar 4.9** Pengujian Rasio Konversi saat Perhitungan dan Implementasi

Pada gambar 4.9 dapat diamati grafik perbandingan *duty cycle* dan rasio konversi konverter dari hasil perhitungan dan implementasi. Dapat dilihat bahwa rasio konversi dari hasil implementasi sudah mendekati nilai rasio konversi dari hasil simulasi. Namun pada rentang *duty cycle* 0,3; 0,4; dan 0,45, nilai rasio konversi dari hasil implementasi lebih tinggi dari nilai rasio konversi dari hasil perhitungan. Saat *duty cycle* 0,5; 0,75; dan 0,8 nilai rasio konversi dari hasil implementasi sama dengan nilai rasio konversi dari hasil perhitungan. Saat *duty cycle* 0,55; 0,6 dan 0,7 nilai rasio konversi dari hasil implementasi lebih rendah daripada nilai rasio konversi dari hasil perhitungan. Terjadinya perbedaan nilai tersebut dikarenakan ketidakidealan komponen yang digunakan,



diantaranya kapasitor, induktor, MOSFET dan dioda yang memiliki rugi-rugi resistansi.

*Duty cycle* minimal yang bisa diatur pada konverter adalah 30%, karena saat diatur di bawah 30% nilai arus  $I_{L1}$  terlalu kecil, sehingga menyebabkan induktor  $L_1$  berada dalam mode DCM atau menyentuh angka nol. Bentuk gelombang  $I_{L1}$  saat *duty cycle* sebesar 20% dapat dilihat pada gambar 4.10. Efek dari induktor  $L_1$  yang berada dalam mode DCM adalah *ripple* arus  $I_{L1}$  yang sangat besar. *Ripple* arus yang sangat besar ini menghasilkan permasalahan rugi-rugi belitan yang tinggi. Juga, ayunan fluks besar yang dihasilkan menimbulkan kerugian inti yang tinggi.



**Gambar 4.10** Sinyal  $V_{GS}$  dan  $I_{L1}$  saat *duty cycle* sebesar 20%

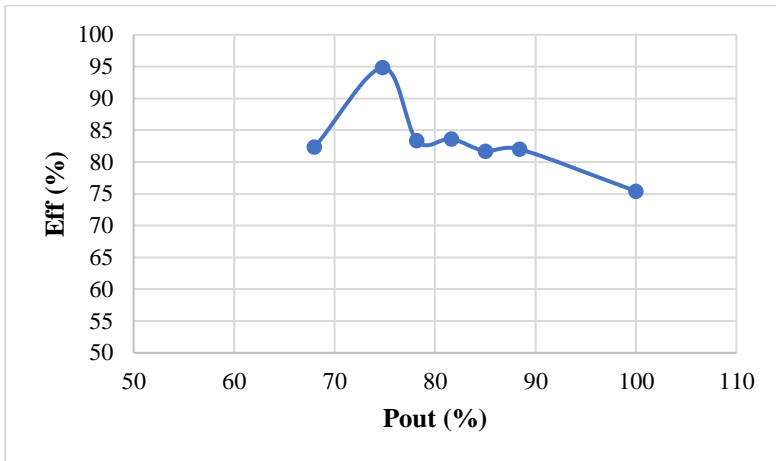
Dapat disimpulkan bahwa konverter telah bekerja sesuai dengan desain dan simulasi, karena hasil pengujian rasio konversi implementasi telah mendekati rasio konversi dari hasil simulasi.

#### 4.4. Pengujian Efisiensi

Pengujian efisiensi konverter dilakukan untuk mengetahui efisiensi konverter dengan daya keluaran yang bervariasi. Pada pengujian efisiensi, tegangan masukan diatur konstan 17 Volt. Konverter diatur hingga mencapai tegangan keluaran 340 Volt dengan daya keluaran diubah-ubah 68% -100% dari *rating*, yaitu 34 Watt - 50 Watt.

Pengujian dilakukan pada daya keluaran 68% - 100% karena keterbatasan beban yang ada pada laboratorium. Dengan diaturnya tegangan keluaran agar bernilai konstan, maka untuk mendapatkan daya beban yang kecil dibutuhkan *rheostat* yang bernilai besar. *Rheostat* maksimal yang ada di laboratorium adalah 3400  $\Omega$  dengan rating arus maksimal 5 A. Dengan *rheostat* maksimal ini, nilai beban minimal konverter adalah 34 Watt, atau 68% dari *rating*.

Pengujian efisiensi dilakukan dengan mengubah-ubah *duty cycle* dan mengubah-ubah *rheostat* agar tegangan keluaran bernilai konstan 340 Volt. Pengukuran efisiensi dirumuskan sebagai perbandingan daya keluaran dengan daya masukan dalam persen. Grafik pengujian efisiensi konverter dapat dilihat pada gambar 4.11.



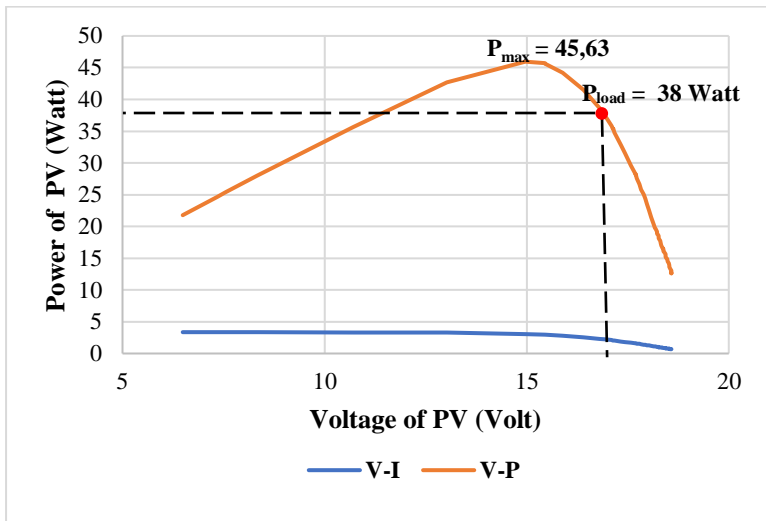
**Gambar 4.11** Grafik Pengujian Efisiensi Konverter

Dapat dilihat pada gambar 4.11 bahwa konverter memiliki nilai efisiensi maksimum 94,8% pada daya keluaran 74,8 % atau 37,4 Watt. Efisiensi konverter sebesar 82% saat daya keluaran 68% dan memiliki efisiensi 75% saat konverter dibebani 100%. Terlihat bahwa efisiensi konverter semakin menurun seiring dengan naiknya daya keluaran. Hal ini dikarenakan semakin besar daya keluaran, maka akan besar pula arus yang mengalir pada rangkaian. Rumus rugi-rugi daya adalah kuadrat arus yang mengalir dikalikan resistansi ( $I^2.R$ ). Maka, semakin besar arus yang mengalir menyebabkan rugi-rugi daya semakin besar pula. Oleh sebab itu, semakin besar daya keluaran konverter, maka efisiensi konverter akan

menurun. Pada gambar 4.11 terdapat fluktuasi nilai efisiensi dikarenakan adanya ketidaktepatan alat ukur. Dari hasil pengujian, didapatkan kesimpulan bahwa efisiensi rata-rata konverter adalah 83,3%.

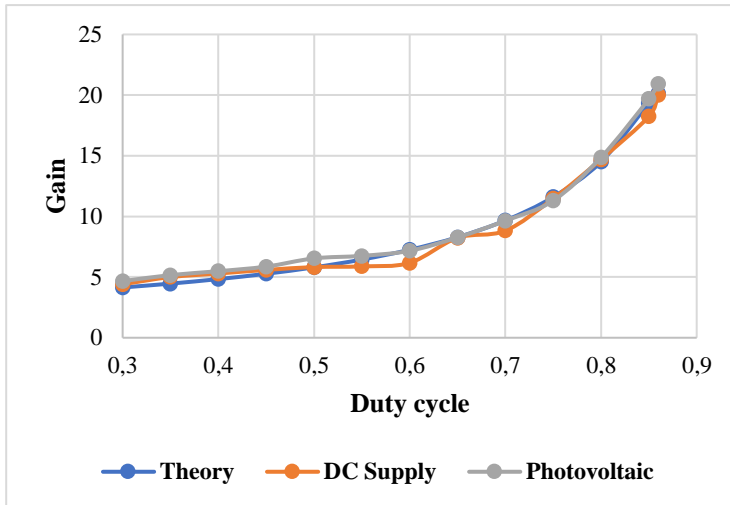
#### 4.5. Pengujian Rasio Konversi Menggunakan Modul Fotovoltaik

Pengujian rasio konversi menggunakan modul fotovoltaik bertujuan untuk mengetahui kerja yang sebenarnya dari konverter. Tujuan penelitian ini adalah konverter yang diaplikasikan pada fotovoltaik.



**Gambar 4.12** Kurva Plot Fotovoltaik

Hasil plot kurva fotovoltaik terlihat pada gambar 4.12. Kurva diplot pada irradians 545 Watt/m<sup>2</sup>. Suhu modul saat pengujian adalah 41°C. Fotovoltaik memiliki daya maksimum 45,63 Watt. Oleh karena konverter memiliki efisiensi rata-rata 83,3%, maka pada saat pengujian ini konverter diberi beban 38 Watt.



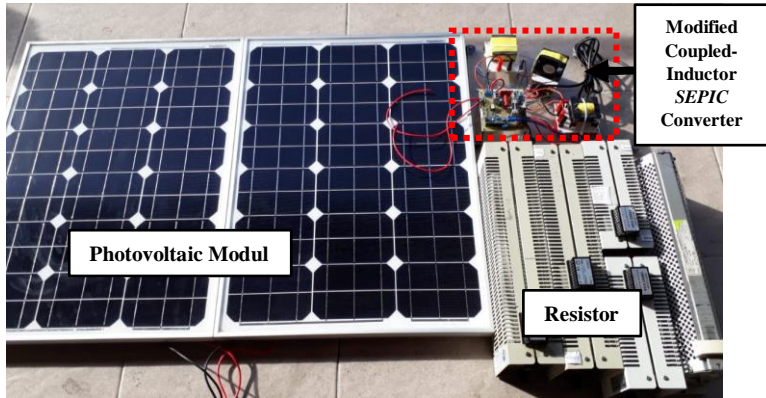
**Gambar 4.13** Perbandingan Nilai Gain Konverter dari Hasil Perhitungan, Pengujian Menggunakan *Variable DC Supply* dan Pengujian Menggunakan Fotovoltaik

Pada gambar 4.13 dapat diamati perbandingan hasil perhitungan dan pengujian implementasi menggunakan masukan tegangan fotovoltaik. Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah *duty cycle* pada rentang 30% hingga 86%. Terlihat pada gambar 4.13, hasil pengujian *gain* menggunakan modul fotovoltaik sudah sesuai dengan teori. Oleh karena konverter memiliki rating tegangan 340 Volt, untuk mendapatkan beban 38 Watt digunakan *rheostat* yang diatur konstan pada nilai 3042  $\Omega$ .

Perubahan *duty cycle* akan berdampak pada kenaikan atau penurunan tegangan keluaran. Saat *duty cycle* bernilai kurang dari *rating*, maka akan menyebabkan tegangan keluaran juga bernilai kurang dari *rating*. Begitu pula sebaliknya, saat *duty cycle* lebih besar dari *rating*, maka akan menyebabkan tegangan keluaran bernilai lebih besar dari *rating*. Oleh karena nilai *rheostat* yang tidak diubah-ubah, sedangkan tegangan keluaran berubah-ubah tergantung *duty cycle*, maka daya beban pun berubah-ubah. Perubahan daya beban akan berdampak pada perubahan tegangan masukan dan arus masukan dari fotovoltaik karena fotovoltaik akan memberi daya sesuai dengan kebutuhan beban. Oleh karena itu, perbedaan pengujian menggunakan modul fotovoltaik dengan menggunakan *Variable DC Supply* terletak pada perbedaan tegangan

masukan, dimana pada pengujian menggunakan *Variable DC Supply*, tegangan masukan bernilai konstan 17 Volt.

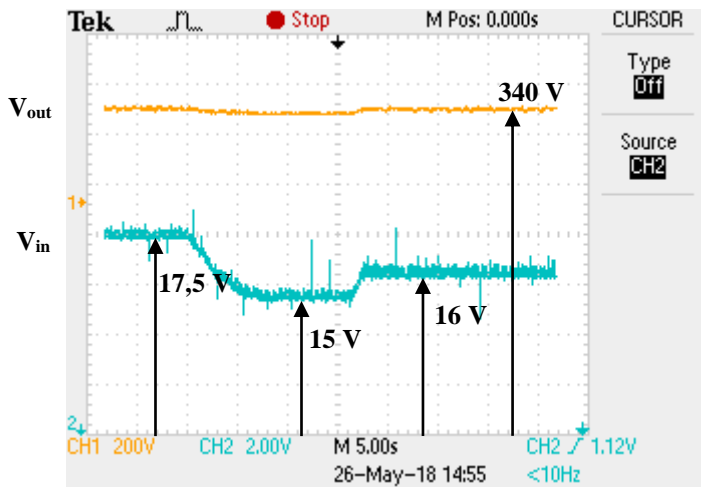
Dari hasil pengujian yang terlihat pada gambar 4.13, dapat disimpulkan bahwa konverter telah bekerja sesuai dengan desain dan bekerja dengan baik saat dihubungkan dengan modul fotovoltaik.



**Gambar 4.14** Pengujian Modul Konverter dengan Tegangan Masukan dari Fotovoltaik

#### **4.6. Pengujian Respon Dinamik Konverter**

Pengujian respon dinamik konverter bertujuan untuk mengetahui apakah kerja dari pengontrol sudah berhasil atau belum. Pengontrol harus dapat mempertahankan tegangan keluaran bernilai konstan 340 Volt dengan nilai tegangan masukan berubah-ubah. Pengujian dilakukan dengan cara memberi tegangan masukan 15, 16, dan 17,5 Volt, kemudian pengontrol akan mengatur nilai *duty cycle* agar tegangan keluaran konstan 340 Volt. Oleh karena itu, respon yang diberikan oleh pengontrol harus cepat terhadap perubahan tegangan masukan agar hasil tegangan keluaran selalu konstan. Gambar 4.15 merupakan hasil pengujian respon dinamik konverter.



**Gambar 4.15** Hasil Pengujian Dinamik Konverter

Perubahan tegangan masukan akan direspon oleh pengontrol, kemudian menyebabkan perubahan *duty cycle*. Dari gambar 4.15 dapat disimpulkan bahwa respon pengontrol sudah bekerja dengan baik, terbukti dengan terjaganya tegangan keluaran konstan 340 Volt saat tegangan masukan berubah-ubah.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan dan saran dari serangkaian kegiatan penelitian yang dilakukan.

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian implementasi dari Konverter DC - DC *SEPIC* Termodifikasi Induktor Terkopel untuk aplikasi pada fotovoltaik dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel memiliki rasio konversi 20 kali (17 Volt menjadi 340 Volt) saat dioperasikan dengan *duty cycle* 86% dengan mode pembebanan penuh (50 W).
2. Semakin tinggi nilai *duty cycle* dan semakin besar perbandingan belitan induktor terkopel ( $n$ ) maka semakin besar rasio konversi.
3. Pengujian konverter untuk aplikasi fotovoltaik telah sesuai dengan simulasi dan pengujian menggunakan *Variable DC Supply*.
4. Pada implementasi konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel akan mengalami mode DCM apabila *duty cycle* yang diaplikasikan ke rangkaian kurang dari 30%.
5. Implementasi konverter *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel memiliki efisiensi maksimum 94,8% pada daya keluaran 74,8 % (37,4 Watt) dan efisiensi rata-rata 83,3%.
6. Pada sistem kerja dinamis konverter, tegangan keluaran bernilai konstan 340 Volt saat tegangan masukan berubah-ubah pada rentang 15-17,5 Volt.

#### **5.2. Saran**

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Menggunakan kawat dengan resistansi yang rendah pada implementasi induktor dan induktor terkopel, karena induktor dan induktor terkopel merupakan komponen yang memiliki rugi-rugi yang besar.

2. Pemilihan komponen agar dipertimbangkan resistansi dalam agar memperkecil rugi-rugi.
3. Menambah kontrol MPPT sehingga dapat diperoleh daya yang optimal dari fotovoltaik.
4. Rangkaian konverter DC - DC *SEPIC* termodifikasi induktor terkopel dapat dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat digunakan sebagai masukan inverter yang terhubung jala-jala.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wuhua Li, Xiaodong Lv, Yan Deng, Jun Liu, dan Xiangning He, "A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications," *IEEE*, hlm. 364–369, 2009.
- [2] Doo-Yong Jung, Young-Hyok Ji, dan Sang-Hoon Park, "Interleaved Soft-Switching Boost Converter for Photovoltaic Power-Generation System," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 26, hlm. 1137–1145, Apr 2011.
- [3] Dongyan Zhou dan Andzrej Pietkiewicz, "A THREE-SWITCH HIGH-VOLTAGE CONVERTER," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 14, hlm. 177–183, Jan 1999.
- [4] Roger Gules, Walter Meneghette dos Santos, Flavio Aparecido dos Reis, dan Eduardo Felix, "A MODIFIED *SEPIC* CONVERTER WITH HIGH STATIC GAIN FOR RENEWABLE APPLICATIONS," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2013.
- [5] Wei Gu, "Designing A *SEPIC* Converter," *Natl. Semicond.*, no. Application Note 1484, Jun 2007.
- [6] Jeff Falin, "Designing DC/DC converters based on *SEPIC* topology," *Tex. Instrum. Inc.*, 2008.
- [7] John Betten, "Benefits of a coupled-inductor *SEPIC* converter," *Tex. Instrum. Inc. Power Manag.*, 2011.
- [8] Bryce Hesterman, "Analysis and Modeling of Magnetic Coupling," Apr 2007.
- [9] Dian Akbar Karismasani, *DESAIN DAN IMPLEMENTASI SOFT-SWITCHING BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER DENGAN METODE INDUKTOR TERKOPEL UNTUK APLIKASI ENERGY STORAGE SYSTEM PADA PESAWAT TANPA AWAK TENAGA SURYA*. Surabaya: ITS, 2017.
- [10] Gusti Rinaldi Z, *DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC-DC RASIO TINGGI BERBASIS PENSAKLARAN KAPASITOR DAN INDUKTOR TERKOPEL*. Surabaya: ITS, 2016.
- [11] Texas Instruments Incorporated, "Inductor and Flyback," 2001.
- [12] RETScreen International, Clean Energy Decision Support Center, *Photovoltaic Project Analysis*. Minister of Natural Resources Canada 2001-2004, 2001.
- [13] TDK Group Company, "TDK ETD 49/25/16 Core and accessories," Jun-2013.
- [14] C. W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, *Idyllwild, California*. USA: Marcel Dekker, Inc, 1978.

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

## LAMPIRAN

### 1. Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter (mm)	Luas Area (mm <sup>2</sup> )	Arus (A)
1	7,350	42,4000	119
2	6,540	33,6000	94
3	5,190	21,2000	75
4	5,190	21,2000	60
5	4,620	16,8000	47
6	4,110	13,3000	37
7	3,670	10,6000	30
8	3,260	8,3500	24
9	2,910	6,6200	19
10	2,590	5,2700	15
11	2,300	4,1500	12
12	2,050	3,3100	9,3
13	1,830	2,6300	7,4
14	1,630	2,6300	5,9
15	1,450	1,650	4,7
16	1,290	1,3100	3,7
17	1,150	1,0400	2,9
18	1,024	0,8230	2,3
19	0,912	0,6530	1,8
20	0,812	0,5190	1,5
21	0,723	0,4120	1,2
22	0,644	0,3250	0,92
23	0,573	0,2590	0,729
24	0,511	0,4120	0,577
25	0,455	0,1630	0,457
26	0,405	0,1280	0,361
27	0,361	0,1020	0,288
28	0,321	0,0804	0,226
29	0,286	0,0646	0,182
30	0,255	0,0503	0,142

## 2. Listing program Arduino

### a. *Open Loop*

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3f,16,2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(A0,INPUT);
  //Phase and Frequency Correct PWM
  TCCR1A = _BV(COM1A1)|_BV(COM1B1);//
  TCCR1B = _BV(WGM13)|_BV(CS10);
  ICR1 = 334;
  OCR1A = 286.238;//=334*D
}

void loop() {
  // sensor voltage
  int sensorValue = analogRead(voutPin);
  // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0
- 5V):
  float voltage = sensorValue * (250.0 / 1023.0);
  // print out the value you read:
  Serial.println(voltage);
}
```

### b. *Closed-Loop*

```
#include <PID_v1.h>
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=0.06, Ki=0.3, Kd=0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
```

```

pinMode(9,OUTPUT);
pinMode(A0,INPUT);
Serial.begin(9600);

//Phase and Frequency Correct PWM
TCCR1A = _BV(COM1A1)|_BV(COM1B1);
TCCR1B = _BV(WGM13)|_BV(CS10);
ICR1 = 334;
OCR1A = Output; //=334*D

Input = analogRead(A0);
Setpoint = 485; //240/480 *1023

myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(0,290.58); //87%
}

void loop() {
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
    myPID.SetOutputLimits(130,290.582); //Duty max=87% = 290.582
    // put your main code here, to run repeatedly:
    Input = analogRead(A0);
    myPID.Compute();
    analogWrite(9, Output);
    Setpoint = 485; //240/480 *1023
    Serial.print(analogRead(A0));
    Serial.print(" ");
    Serial.println(Output);
    delay(500);
}

```

**--Halaman ini sengaja dikosongkan--**

## RIWAYAT HIDUP



Penulis buku penelitian berjudul **“Desain Dan Implementasi Konverter DC - DC Gain Tinggi Topologi SEPIC Termodifikasi Induktor Terkopel Untuk Aplikasi Fotovoltaik”** ini bernama lengkap Dewi Sucilia Kurniawati, dan memiliki panggilan akrab Cici. Penulis lahir di Jakarta, 21 Januari 1997 dan hidup besar di Madiun. Hidup di sebuah desa di Kabupaten Madiun, bersama kedua orang tua dan seorang kakak. Riwayat pendidikan penulis ialah SDN 04 Pajaran, SMPN 1 Saradan, SMAN 1 Mejayan. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan Strata 1 di Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis memiliki pengalaman organisasi dan kepanitiaan yang cukup banyak diantaranya Departemen Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro periode 2015/2016 dan 2017/2018, Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik, BARONAS (Lomba Robot Nasional 2016 dan 2017), ELECTRA (Electrical Competition, Tour and Rally 2015, 2016, 2017). Selain itu penulis juga memiliki pengalaman keilmiahannya yaitu sebagai Juara 3 CIIC Thailand.